

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYSOKORYCHLOSTNÍ FRÉZOVÁNÍ
HLINÍKOVÝCH SLITIN PRO LETECKÝ PRŮMYSL
HIGH SPEED MILLING OF ALUMINUM ALLOYS FOR AIRCRAFT INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ PAZDERA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2011

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je komplexní analýza vysokorychlostního obrábění v leteckém průmyslu. Práce zkoumá především obrábění hliníkových slitin, jejichž charakteristikou se zabývá úvodní část. V dalších kapitolách najdeme pohled na vysokorychlostní obrábění z hlediska tvorby třísky, silového zatížení a drsnosti povrchu obrobené plochy. Závěr práce je zaměřen na problematiku CNC řízení, obrábění tvarů typických v letectví a popis hrubovacích trajektorií, jež zvyšují produktivitu výroby.

Klíčová slova

Hliníkové slitiny, vysokorychlostní obrábění, letecký průmysl, úběr materiálu.

ABSTRACT

The aim of this paper is a complex analysis of the high speed cutting in the aircraft industry. The paper studies especially the machining of aluminum alloys, which are characterized in the first part. We can find in next chapters a view on the high speed cutting from aspect of the chip formation, the force load and the machined surface roughness. The end of the paper is focused on the issues of the CNC, machining of typical aircraft shapes and description of roughing paths, which increase the productivity.

Key words

Aluminum alloys, High Speed Cutting, aircraft industry, Material Removal Rate.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAZDERA, L. *Vysokorychlostní frézování hliníkových slitin pro letecký průmysl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 47 s., bez příloh., vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN PRO LETECKÝ PRŮMYSL vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu použitých zdrojů, který je součástí této práce.

Datum 25. 5. 2011

.....
Lukáš Pazdera

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za odborné rady při vypracování bakalářské práce, Ing. Davidu Pratovi za cenné konkrétní připomínky a rodině za psychickou podporu.

OBSAH

Abstrakt.....	2
Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Obsah	5
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	7
2 ROZBOR HLINÍKOVÝCH SLITIN, JEJICH VLASTNOSTÍ A OBROBITELNOSTI	8
2.1 Materiálová charakteristika hliníku	8
2.2 Rozdělení tvářených hliníkových slitin do tříd	10
2.2.1 Vliv legovacích prvků	10
2.2.2 Skupina 2000	10
2.2.3 Skupina 6000	11
2.2.4 Skupina 7000	12
2.3 Hlavní typy tepelného zpracování hliníkových slitin	13
2.4 Obrobitelnost hliníkových slitin.....	13
3 VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ	14
3.1 Základy frézování.....	14
3.1.1 Nesousledné frézování	14
3.1.2 Sousledné frézování	14
3.2 Vysokorychlostní obrábění.....	15
3.2.1 Úvod do vysokorychlostního obrábění	15
3.2.2 Historie vysokorychlostního obrábění	16
3.2.3 Hranice vysokorychlostního obrábění	16
3.2.4 Průmyslová odvětví vysokorychlostního obrábění	17
3.3 Tvorba třísky	17
3.3.1 Mechanismus tvorby třísky.....	17
3.3.2 Zóny stříhu	18
3.3.3 Teplota třísky	19
3.3.4 Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění dvou hliníkových slitin	20
3.3.4.1 Slévárenská slitina ISO AlSi7Mg.....	20
3.3.4.2 Tvářená slitina AW EN 7075	20
4 SILOVÉ ZATÍŽENÍ A KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU	21
4.1 Řezné síly	21
4.1.1 Komponenty řezné síly.....	21
4.1.2 Vliv řezné rychlosti	22
4.1.3 Vliv ostatních parametrů procesu.....	23
4.1.4 Vliv materiálu obrobku	24
4.2 Kvalita obrobeného povrchu	25
4.2.1 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu	25
4.2.2 Vibrace.....	26
4.2.2.1 Základní rozdělení vibrací	26
4.2.2.2 Vliv vibrací na řezný proces	26
4.2.2.3 Stability lobe diagram.....	27
4.2.2.3.1 Vliv vibrací na kvalitu povrchu.....	28
5 POŽADAVKY NA CNC ŘÍZENÍ A PROGRAMOVÁNÍ.....	30

5.1 Proces vytváření geometrie nástroje.....	30
5.1.1 Postup vytváření geometrie nástroje.....	30
5.1.2 Typy geometrie nástroje.....	30
5.1.2.1 Lineární interpolace	31
5.1.2.2 Kruhová interpolace	31
5.1.2.3 Polynomická interpolace	31
5.1.3 Interpolační chyba.....	31
5.2 5ti-osé obrábění	31
5.2.1 Charakteristika 5ti-osého obrábění	31
5.2.2 Optimalizace trajektorie.....	32
5.2.2.1 Pravidla pro optimalizaci dráhy nástroje.....	32
5.2.3 Rozdělení 5ti-osého obrábění podle účelu.....	33
5.2.3.1 Produktivita	33
5.2.3.2 Přesnost.....	33
5.2.4 Krátké srovnání 5ti-osého obrábění s 3-osým.....	33
5.3 Požadavky kladené na CNC obráběcí stroje.....	33
5.3.1 Druhy CNC strojů	33
5.3.2 Technická charakteristika strojů pro HSC	34
5.3.3 Příklady CNC strojů pro HSC	34
5.3.3.1 Obráběcí centrum Mikron HPM.....	34
5.3.3.2 Obráběcí centrum Millac 1000VH	35
5.4 Velkoobjemové obrábění hliníkových slitin	36
5.4.1 Vybrané hrubovací techniky.....	36
5.4.1.1 Trochoidní obrábění	36
5.4.1.2 Axiální zahlubování	37
5.4.1.3 Trajektorie zigzag.....	37
5.4.2 Obrábění typických tvarů součástí pro letecký průmysl	38
5.4.2.1 Obrábění kapes a kontur.....	38
5.4.2.1.1 Způsob vstupování nástroje do uzavřené kapsy	39
5.4.2.1.2 Obrábění rohu.....	39
5.4.2.1.2.1 Porovnání odlišných naprogramování obrábění rohu	39
5.4.2.2 Obrábění tenkostěnných součástí	40
6 ZÁVĚR.....	41
Seznam použitých zdrojů	42
Seznam použitých zkratk a symbolů	46

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Hliníkové slitiny patří mezi nejpoužívanější materiály v leteckém průmyslu, protože díly z nich tvoří většinou část trupu letadla. Jejich používání v leteckém průmyslu je zcela logické, zajišťují totiž významnou úsporu hmotnosti. Hliník je kov vyznačující se nízkou pevností, ale přidáním několika procent vhodné legury jeho pevnost výrazně vzroste. Dalšího zvýšení pevnosti je možné dosáhnout tepelným zpracováním. Některé hliníkové slitiny mají po precipitačním vytvrzení pevnostní charakteristiky srovnatelné s kvalitními konstrukčními oceli, a to při více než třikrát nižší hustotě. Tento fakt je naprosto výmluvným důvodem pro používání hliníkových slitin v leteckém průmyslu. [1, 2, 3]

Letecké součásti mají často velmi složitý tvar, ale přesto se zhotovují velmi často obráběním, ostatní metody výroby, jako třeba odlévání, nejsou příliš vhodné. V extrémních případech může být obráběním odebráno až 95% materiálu z polotovaru. [1, 4]

Vysokorychlostní obrábění (HSC) bývá s úspěchem používáno jak na hrubovací, tak na dokončovací operace. Vysoká rychlost otáček vřetena a z ní plynoucí vysoká řezná rychlost zvyšuje úběr materiálu za čas, přičemž není nutno zvyšovat posuv. Někdy je rovněž vyžadována dobrá kvalita obrobeného povrchu, což HSC dokáže splnit. [5, 6]

Účelem práce je přiblížit tuto problematiku z nejrůznějších úhlů pohledu. Vysoký úběr materiálu, někdy se užívá anglický termín „Material Removal Rate“ (MRR), klade vysoké požadavky na nástroj, stroj, CNC řízení i zvolení vhodné trajektorie. Proto jsou v této práci mimo jiné popsány vlivy parametrů na velikost složek řezné síly, základy CNC řízení nebo požadavky na kladené obráběcí stroje. V závěrečné části práce lze najít některé typické aplikace HSC v leteckém průmyslu, a také stručné vysvětlení některých novějších typů trajektorií, které šetří nástroj a zvyšují MRR. [6, 7]

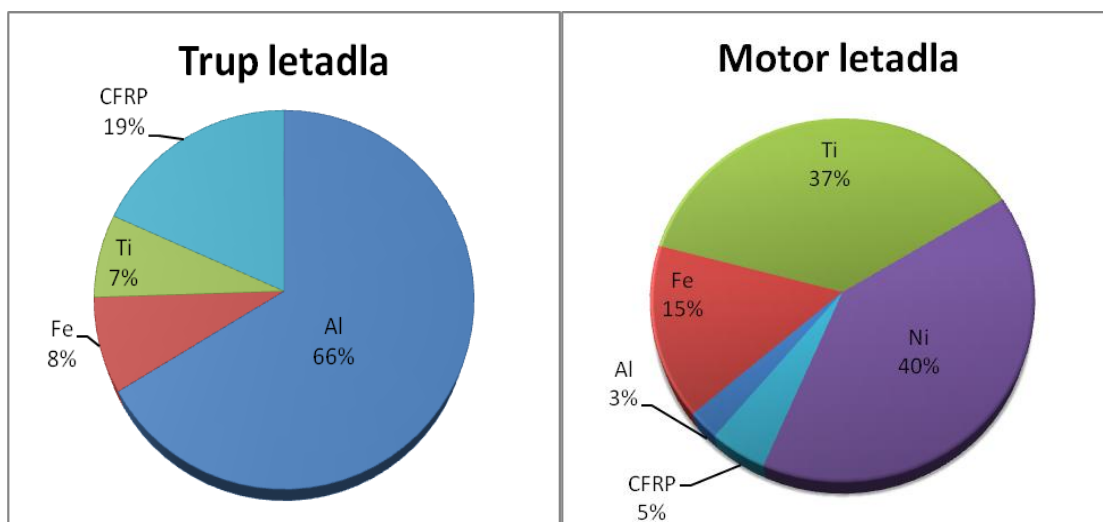
2 ROZBOR HLINÍKOVÝCH SLITIN, JEJICH VLASTNOSTÍ A OBROBITELNOSTI

2.1 Materiálová charakteristika hliníku

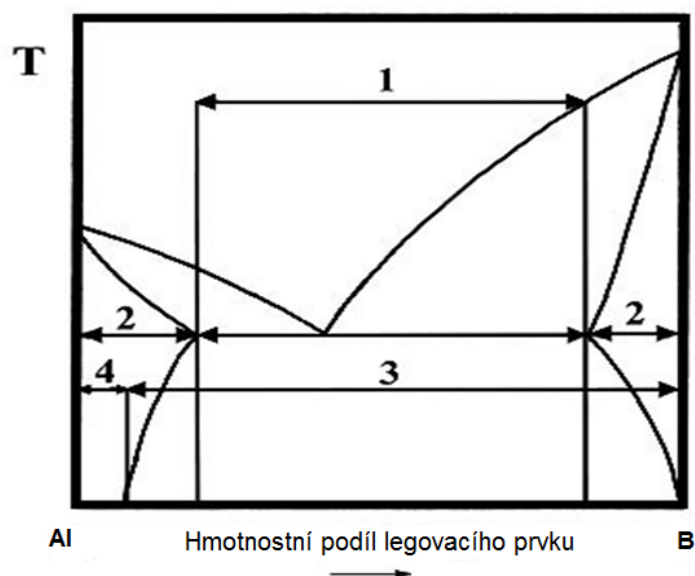
Hliník je po železe (resp. oceli) druhým nejpoužívanějším kovem. Roční světová spotřeba tohoto kovu je 25 milionů tun. [3] Kvůli své příliš vysoké tažnosti a z toho plynoucí nízké pevnosti není hliník prakticky nikdy používán jako čistý prvek, ale ve formě slitin. [1] Poměrně malý přídavek legovacího prvku výrazně zvýší mez kluzu. Nutno podotknout, že mez kluzu u všech hliníkových slitin je pouze smluvní (viz obr. 2.3). [8] Hliníkové slitiny rozdělujeme na slitiny ke tváření a slévárenské. [1, 9] Mimo to se dělí na precipitačně vytvrditelné a nevytvrditelné. [9] Pro letecký průmysl se používají tvářené slitiny vytvrditelné. Na obrázku 2.1 můžeme spatřit, že jsou používány hlavně na trup letadla díky úspoře hmotnosti. Naopak se téměř nepoužívají v motoru kvůli nízké teplotě tání. Mezi hlavní přednosti hliníkových slitin patří:

- nízká hustota (potažmo hmotnost)
- korozivzdornost
- možnost tepelného zpracování povrchu
- absence tranzitního chování při nízkých teplotách
- výborná tepelná a elektrická vodivost [3]

Pro letecký průmysl jsou nezbytné hlavně první čtyři z výše vyjmenovaných vlastností.

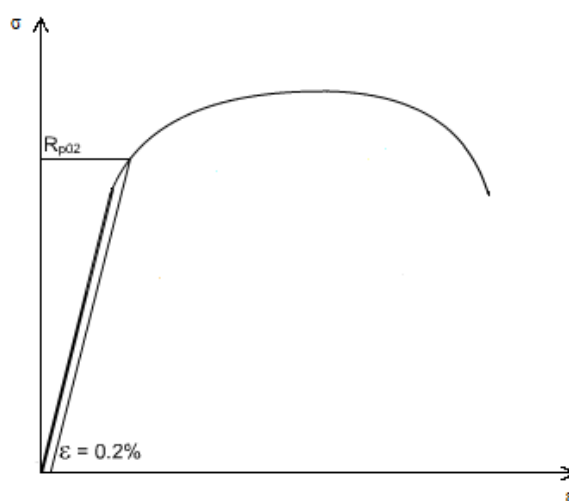


Obr. 2.1 Zastoupení kovů v trupu a motoru letadla [2]



Obr. 2.2 – obecný rovnovážný fázový diagram hliníkových slitin [10]

- 1 - slévárenské slitiny
- 2 - slitiny ke tváření
- 3 – nevytvrditelné slitiny
- 4 – precipitačně vytvrditelné slitiny



Obr. 2.3 – Tahový diagram hliníkových slitin [8]

Tab. 2.1 Vybrané vlastnosti hliníku [3]

Vlastnost	Hodnota
atomové číslo	13
hustota	2698 kg.m-3
teplota tání	660, 45 °C
koeficient tepelné roztažnosti	23, 1.10 ⁻⁶ K-1
modul pružnosti	69 000 MPa
Poissonovo číslo	0, 33

2.2 Rozdělení tvářených hliníkových slitin do tříd

Tab. 2.2 Rozdělení hliníkových slitin do tříd podle hlavních legovacích prvků podle normy EN 573 [3, 9]

Třída	Legovací prvek
1000	Bez legur
2000	Cu
3000	Mn
4000	Si
5000	Mg
6000	Mg a Si
7000	Zn (a Cu)
8000	Jiné prvky

Skupiny 1000, 3000, 5000 a 8000 jsou slitiny vytvrditelné pouze deformací a skupiny 2000, 4000, 6000, 7000 jsou vytvrditelné strukturně, tzn. za pomoci tepelného zpracování. Třídy nejčastěji využívané v leteckém průmyslu jsou 2000 a 7000. [3, 9]

2.2.1 Vliv legovacích prvků

Měď zvyšuje pevnost a obrobiteľnosť a usnadňuje tepelné zpracování. Na druhou stranu snižuje odolnost proti korozi a prakticky znemožňuje svařitelnost. Mangan zlepšuje tvárnost a slévatelnost. Křemík zlepšuje korozivzdornost a slévatelnost. Hořčík zlepšuje pevnost a korozivzdornost. Zinek výrazně zvyšuje pevnost, ale snižuje korozivzdornost a železo zajišťuje pevnost a tvrdost. [1, 3]

2.2.2 Skupina 2000

Hlavním legovacím prvkem je měď, v menším množství bývá přítomen hořčík a křemík. Jedná se o vytvrditelné slitiny. Vliv mědi spočívá ve zvýšení mechanických charakteristik, usnadnění obrobiteľnosti a tepelného zpracování. Slitiny s mědí jsou naopak velice těžko svařitelné a jsou náchylné k mezikrystalické korozi. [3]

EN AW 2017A (ČSN 42 4201, ISO AlCu4MgSi(A)) [11,12]

4 % Cu; 0,5% Si; 0,7% Mg; 0,7% Mn [14]

Ve vytvrzeném stavu T4:

$\rho = 2790 \text{ kg/m}^3$ [3]

$R_{p0,2} = 275 \text{ MPa}$ [3]

$R_m = 425 \text{ MPa}$ [3]

Tato slitina (zvaná též dural) [15], je typickým zástupcem této skupiny. Používá se pouze ve vytvrzeném stavu. Vyznačuje se průměrnou pevností, dobrou obrobiteľnosť a vysokou únavovou odolností. Je velmi často využívaná v různých mechanických aplikacích, v automobilovém a lodním průmyslu, ne však tolik v leteckém průmyslu. Nejčastější aplikace je na výrobu nýtů. [3, 14, 15]

EN AW 2024 (ČSN 42 4203, ISO AlCu4Mg1) [11,12]

4,4 % Cu; 1,5% Mg; 0,6% Mn [14]

Ve vytvrzeném stavu T3 nebo T4:

$\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$ [3]

$R_{p0,2} = 310 \text{ MPa}$ [12]

$R_m = 440 \text{ MPa}$ [12]

Jedná se o vylepšenou variantu slitiny 2017A. V Česku se vžilo označení superdural [15]. Díky většině množství hořčíku disponuje vyšší mezí pevnosti. Stejně jako dural se používá pouze ve vytvrzeném stavu. Superdural je využíván hojně v leteckém a zbrojním průmyslu, a to pouze ve vytvrzeném stavu. Bývá tepelně zpracováván způsobem T351. Tenkostěnné součásti jsou zpracovávány formou T8. Tato úprava kromě zvýšení mechanických charakteristik zvýší i korozivzdornost. [3, 14, 15]

2.2.3 Skupina 6000

Legovacími prvky této skupiny jsou křemík a hořčík. Slitiny v této skupině se vyznačují dobrou odolností proti korozi, svařitelností, výbornou schopností ke tváření a střední pevností. [3]

EN AW 6061 (ISO AlMg1SiCu) [13]

1% Mg; 0,6% Si; v menším množství Cu a Cr [14]

Ve stavu T651:

$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ [13]

$R_{p0,2} = 240 \text{ MPa}$ [13]

$R_m = 290 \text{ MPa}$ [13]

Bývá využíván na různé nosné prvky, rámy, sloupky, vojenské mosty a také v leteckém průmyslu. [14]

2.2.4 Skupina 7000

Hlavním legovacím prvkem této skupiny je zinek. Jedná se o skupinu s nejlepšími pevnostními charakteristikami ze všech typů hliníkových slitin. Slitiny této skupiny se dělí na 2 podskupiny: bez přídavku mědi a s přídavkem mědi. [3]

Rozdíl mezi zmíněnými podskupinami nám už napovídá charakteristika skupiny 2000. Přítomnost mědi zvýší pevnostní charakteristiky, ale sníží odolnost proti korozi. „Při maximálních pevnostních vlastnostech mají nízkou odolnost proti korozi, tepelným zpracováním lze zvýšit za cenu nižších hodnot pevnostních vlastností. [9]“ Slitiny skupiny 7000 bez mědi jsou svařitelné a korozivzdorné, ovšem je-li součást svařovaná, korozivzdornost se snižuje. Slitiny stejné skupiny s mědí jsou nejpevnější slitiny na hliníkové bázi. [3, 9]

Slitiny bez přídavku mědi:

EN AW 7020 (ČSN 42 4441, ISO AlZn4,5Mg1) [11,12]
4.5% Zn; 1.2% Mg; v menším množství Mn a Cr [14]

Ve stavu T6:

$\rho = 2780 \text{ kg/m}^3$ [3]
 $R_{p0.2} = 280 \text{ MPa}$ [12]
 $R_m = 350 \text{ Mpa}$ [12]

Jedná se o nejčastěji využívanou slitinu ze třídy 7000 bez přídavku mědi. Bývá využívána tepelně zpracovaném a popuštěném stavu T5 nebo T6 na výrobu dopravních prostředků, ve zbrojním průmyslu, ne však příliš v letectví. Mez pevnosti je středně vysoká. Korozivzdornost je také velmi dobrá, pokud součást není svařovaná. Slitina není příliš odolná proti vyšším teplotám a je špatně tvářitelná. [3, 14]

Slitina s přídavkem mědi:

EN AW 7075 (ČSN 42 4222, ISO AlZn5,5MgCu) [11, 12]
5,6% Zn; 2,5% Mg; 1,6% Cu; 0,28% Cr; [3, 14]

Ve stavu T6 nebo T651:

$\rho = 2810 \text{ kg/m}^3$ [13]
 $R_{p0.2} = 505 \text{ MPa}$ [3]
 $R_m = 570 \text{ Mpa}$ [3]

Při pohledu na hodnotu meze pevnosti vidíme, že tato slitina je naprosto rovnocenná kvalitním ocelím, a to při více než 3krát menší hustotě. Tento fakt výstižně demonstruje, proč jsou hliníkové slitiny využívány pro letectví. Slitina 7075 je samozřejmě užívaná v leteckém průmyslu, ale také pro různé sportovní vybavení či šrouby a nýty. Disponuje výbornou odolností vůči únavě, naopak její korozivzdornost příliš dobrá není. Tepelně zpracovávaná bývá metodami T6, T651, T73 nebo T76. První dvě zmíněné metody velmi zvýší pevnostní charakteristiky, druhé dvě zajistí určitý kompromis mezi zachováním

vysoké pevnosti a zvýšením korozivzdornosti. Někdy se chrom ve struktuře nahrazuje zirkoniem, což zlepšuje vytvrditelnost. [3, 14, 15]

2.3 Hlavní typy tepelného zpracování hliníkových slitin

Hliníkové slitiny se v leteckém průmyslu využívají téměř výhradně v tepelně zpracovaném stavu, protože tak vykazují výrazně lepší pevnostní vlastnosti. Tepelné zpracování hliníkových slitin sestává z rozpouštěcího žíhání, rychlého ochlazení a dalších procedur, které se liší podle typu zpracování a jsou popsány v tabulce 2.3. Rozpouštěcí žíhání je ohřev a výdrž na určité teploty, přičemž dojde k rozpuštění přísady v tuhém roztoku. Při prudkém ochlazení neproběhne difúze a přísady se nestihnou rovnovážně uvolnit, takže se vytvoří přesycený tuhý roztok. [3, 9, 10]

Tab. 2.3 Vybrané typy tepelného zpracování hliníkových slitin podle normy EN [3]

Označení	Typ tepelného zpracování
T3	RŽ + ochlazení, deformační vytvrzení, stárnutí
T351	RŽ + ochlazení, vytvrzení tahem, stárnutí
T4	RŽ + ochlazení, stárnutí
T6	RŽ + ochlazení, popouštění
T651	RŽ + ochlazení, vytvrzení tahem, popouštění
T73, T76	RŽ + ochlazení, dvojí popouštění
T8	RŽ + ochlazení, deformační vytvrzení, popouštění

2.4 Obrobitelnost hliníkových slitin

„Mezi hlavní kritéria obrobitelnosti patří životnost nástroje, kvalita povrchu a tvorba třísek. Hliníkové slitiny jsou všeobecně považovány za snadno obrobitelné materiály, protože vznikající síly jsou relativně malé. Teploty jsou dosti nízké, takže je možné vyvinout vysokou řeznou rychlost. [1]“ Obrobitelnost se ještě zlepšuje přidávkou mědi, čili i materiál ČSN 42 4222 (EN AW 7075), který má vysokou mez kluzu (505 MPa), se obrábí poměrně snadno. Jedinou složitostí může být kontrola třísky. „Řez vyžaduje pozitivní úhel čela, který zaručí dobrý odchod třísky a dle možností zamezí tvorbě nárůstků. [1]“ [1, 3]

Je obecně známým faktem, že hliník a jeho slitiny se při obrábění lepí na ostří nástroje. Aby se zabránilo tomuto nežádoucímu jevu, jsou hliníkové slitiny standardně obráběny za pomoci řezné kapaliny, která lepení zabraňuje. Moderním trendem vysokorychlostního obrábění je ovšem omezit, či dokonce vymýtit používání řezné kapaliny i při obrábění hliníkových slitin. Používání řezné kapaliny je nevhodné z ekologického i ekonomického hlediska, a také může způsobit teplotní šoky, které snižují životnost nástrojů. [1, 16].

3 VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ

3.1 Základy frézování

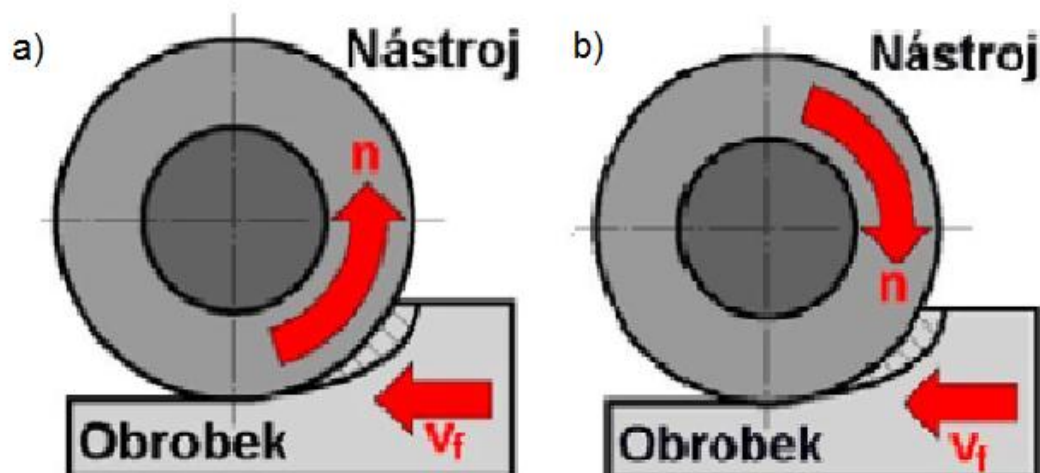
Frézování je obráběcí metoda, při které je hlavní pohyb vždy vykonáván nástrojem a posuvový pohyb buď nástrojem, nebo součástí. „Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. Z technologického hlediska můžeme frézování rozdělit na válcové a čelní, a z nich odvozené způsoby okružní a planetové. Podle kinematiky řezného procesu rozlišujeme nesousledné a sousledné frézování.“ [17]

3.1.1 Nesousledné frézování

Smysl rotace nástroje je proti směru posuvu. Tloušťka třísky se mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K odebírání materiálu nedochází v okamžiku nulové tloušťky, ale dojde k určitému skluzu bříty po obrobku, což způsobuje plastické deformace a špatnou kvalitu povrchu a opotřebení bříty. Nesousledné frézování je používáno při obrábění na konvenčních frézkách, protože jejich konstrukce je pro tento typ obrábění uzpůsobena. [17, 18]

3.1.2 Sousledné frézování

Smysl rotace nástroje je ve směru posuvu. Maximální tloušťka třísky vzniká na počátku záběru zubu a postupně se zmenšuje až na nulovou hodnotu. Tento typ frézování může probíhat pouze na strojích, které mají vymezenou vůli a přepětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. Na druhou stranu ale umožňuje použití vyšších řezných rychlostí, posuvů a potřebuje také menší řezný výkon. Kvalita obrobeného povrchu je rovněž lepší při užití tohoto způsobu. Shrneme-li výše uvedené informace, můžeme konstatovat, že sousledné frézování je mnohem vhodnější pro vysokorychlostní obrábění. Je-li to možné, snažíme se jej v praxi aplikovat. [17]



Obr.3.1 – Schéma válcového frézování. a) Nesousledné, b) Sousedné [18]

U obou způsobů je maximální tloušťka třísky:

$$h_{max} = f_z \cdot \sin \varphi_{max} [17] \quad (3.1)$$

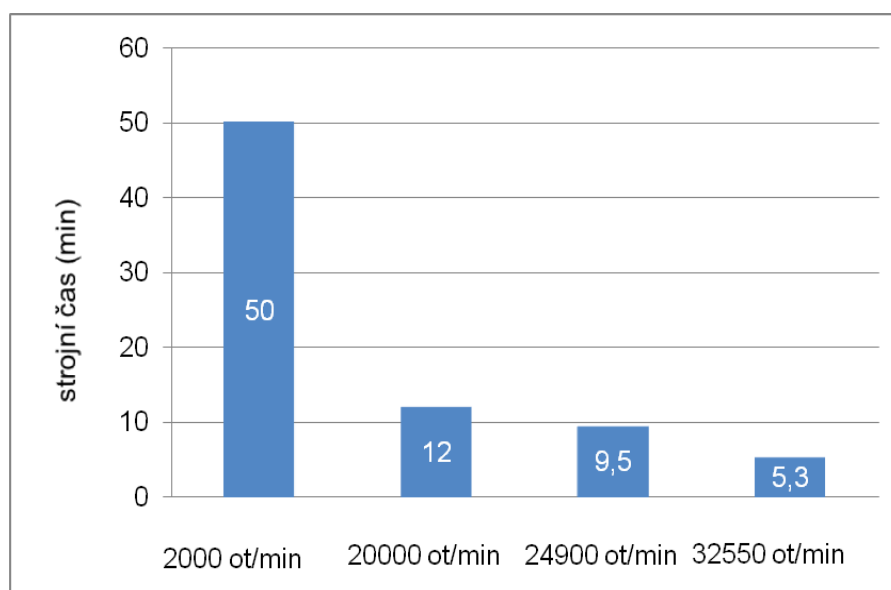
3.2 Vysokorychlostní obrábění

3.2.1 Úvod do vysokorychlostního obrábění

Vysokorychlostní obrábění je velice delikátní technika, která se v poslední době čím dál tím více využívá. Skrývá totiž řadu výhod. Především je to logicky několikanásobné snížení strojního času [19] oproti obrábění na konvenčních strojích - obr. 3.2, přičemž se nesnižuje kvalita obrobeného povrchu. Zlepšuje se tvorba třísky, protože vyšší řezná rychlost zvyšuje úhel stříhu, což zase snižuje tloušťku třísky. Řezná rychlost může být až 10krát vyšší než v případě obrábění na konvenčních strojích. Posuvová rychlost se rovněž zvýší 5-10krát, což podle vztahu 3.2 zvýší úběr materiálu. Tyto aspekty tedy výrazně zvyšují produktivitu výroby, což představuje ekonomické úspory. [7,19, 20]

Úběr materiálu je definován vztahem

$$Q = v_f \cdot a_p \cdot a_e [5] \quad (3.2)$$



Obr. 3.2 – Porovnání strojních časů při frézování kapsy stejným nástrojem při různých otáčkách vřetena [19]

3.2.2 Historie vysokorychlostního obrábění

Vysokorychlostní obrábění se nedá považovat za metodu novou. Hlavní teoretická výhoda vysokorychlostního obrábění, a to snížení řezné síly F_c při zvýšení řezné rychlosti, byla objevena již ve 30. letech minulého století dr. Salomonem [5, 20]. Potřebné řezné podmínky ale nebyly tehdy fyzicky dosažitelné, ať už kvůli malé odolnosti nástrojů, či nízkému výkonu strojů. [5, 20, 21]

3.2.3 Hranice vysokorychlostního obrábění

Zvláštěností je, že „neexistuje žádná analytická definice vysokorychlostního obrábění“ [5]. Můžeme uvést například tyto důvody:

- pro každý obráběný materiál se řezné podmínky odpovídající vysokorychlostnímu obrábění liší. [7]
- vzhledem k neustálému technickému pokroku není účelné stanovovat určitou hranici řezné rychlosti, která by byla považována za vysokorychlostní. [5]

V [22] je uvedeno: „Někteří odborníci se přiklánějí k definici, že o HSC jde tehdy, když střední teplota řezání dosahuje hodnot blízkých teplotě tavení obráběného materiálu. V praxi se ujal názor, že obrábění vysokými řeznými rychlostmi probíhá v oblasti od 600 do 1800 m/min, obrábění superřeznými rychlostmi od 1800 do 18 000 m/min a obrábění ultrařeznými rychlostmi nad 18 000 m/min. V případě těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou slitiny niklu či titanu, se dává spíše přednost výrazu výkonové obrábění.“ [22]

3.2.4 Průmyslová odvětví vysokorychlostního obrábění

Vysokorychlostní obrábění je možné rozdělit do 3 kategorií podle jejich využití v průmyslových odvětvích a k tomu vázaných řezných podmínek a parametrů strojů: [21]

- 1000-5000 ot/min, 10-20 kW, tento typ vysokorychlostního obrábění se nejčastěji využívá v automobilovém průmyslu pro čelní frézování bloků motorů probíhající ve velkých sériích. [21]
- 10 000-30 000 ot/min, 20-40 kW, tyto parametry strojů můžeme najít v leteckém průmyslu. Účelem bývá co největší úběr materiálu. Klasickým příkladem, pro který se využívají stroje s těmito parametry je obrábění kapes či různých kontur a jiné součásti, které se zhotovují odebráním velkého objemu materiálu, což je typické zvláště pro letecký průmysl. [21]
- 1-1,5 kW, 20 000-100 000 ot/min, otáčky jsou velmi vysoké, výkon strojů poměrně malý. Využití najdeme pro dokončovací operace (finišování a leštění) mechanických a elektronických součástek, kde je vyžadovaná vysoká kvalita povrchu. [21]

3.3 Tvorba třísky

3.3.1 Mechanismus tvorby třísky

Na mechanismu tvorby třísky závisí mnoho dalších charakteristických veličin při obrábění jako např.: řezné síly, teplota, opotřebení nástroje, tření či kvalita povrchu. Tříska může vznikat soudrzná či elementární. Soudrzná tříska se ještě dělí na plynulou a článkovanou. Při frézování studujeme třísku pocházející ze záběru jednoho zubu a zkoumáme, jestli se tvoří homogenně (plynule) nebo nehomogenně, tedy jsou patrné stopy střížných rovin (tříska článkovitá) nebo se tříska dělí na jednotlivé elementy. [1, 5, 6, 22]

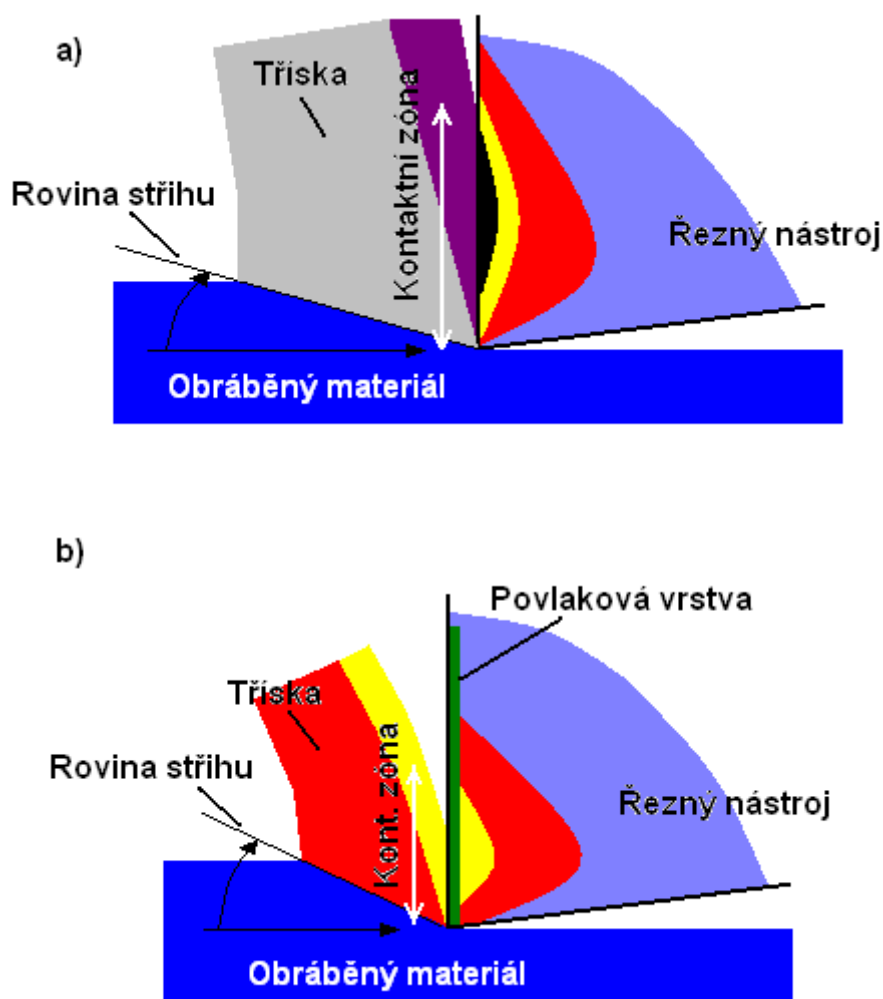
Tvorba třísky u vysokorychlostního obrábění je odlišná od obrábění při konvenčních řezných rychlostech, je doprovázena snížením řezných sil. Dále vyšší řezná rychlost zvýší úhel stříhu, což snižuje tloušťku třísky. Tvorba třísky má při vysokorychlostním obrábění velký význam na dynamiku řezného procesu. Tvorba třísky se liší podle jednotlivých materiálů, ale obecně můžeme říci, že plynulá tříska vzniká při nižších řezných rychlostech, při vyšších řezných rychlostech vzniká tříska článkovaná a elementární. [6, 22]

V [1] lze najít, jak úhel nastavení hlavního ostří ovlivňuje tvorbu třísky. „Čím je úhel nastavení hlavního ostří menší, tím tenčí je utvářená tříska a zabírá větší délku břitu. Namáhání každého jednotlivého břitu je v tomto případě menší a zabírá větší délku břitu (šířka třísky narůstá), což umožňuje zvýšení posuvu na zub. Na druhé straně menší úhel nastavení hlavního ostří znamená, že fréza – při dané délce břitu – může obrábět jen při malých šířkách řezu.“ [1]

3.3.2 Zóny stříhu

Kontakt nástroje a obrobku, při kterém se tvoří tříska, můžeme rozdělit na 4 následující oblasti:

- první stádium odpovídá primární zóně stříhu. Je dosaženo kritického smykového napětí, vzniká trhlina, která se šíří směrem k ostří. Odehrává se zde nejvíc mechanických namáhání, což spotřebuje až 80 % celkového výkonu potřebného k provedení řezné operace. Pro snížení mechanického působení v této oblasti jsou vyvíjeny materiály s lepší obrobitelností. [5, 20, 22]
- druhé stádium je také nazýváno sekundární zónou stříhu. Zde dochází k velkému tření mezi tvořící se třískou a čelem nástroje. Vznikající tření zvyšuje teplotu a opotřebovává nástroj. Teplo bývá odváděno nástrojem, obrobkem, třískou a prostředím, přičemž je snaha, aby nejvíce tepla odcházelo třískou, aby nástroj a obrobek zůstaly nepoškozené. Výhodou vysokorychlostního obrábění je zvýšení podílu tepla odváděného třískou. [5]
- ve třetím stádiu, tzn. terciární zóně stříhu, dochází ke tření mezi obrobeným povrchem a hřbetem nástroje. Důvod tření je prostý. Špička nástroje během odebrání materiálu elasticky deformuje (stlačí) obrobený povrch. Po odsunu špičky dojde k návratu deformovaného povrchu do původního stavu, což způsobuje zmíněné tření. [5] Tloušťka třísky je zde dosti malá, takže se tříska se ochlazuje velmi rychle a u většiny materiálů (např. ocel) nastává tzv. adiabatická přeměna [20, 22]
- Ve čtvrtém stádiu je formace třísky dokončena. [5, 20, 22]



Obr. 3.3 Srovnání mechanismu tvorby třísky při konvenčním a) a vysokorychlostním obrábění b) [7]

3.3.3 Teplota třísky

Na obr. 3.3 lze pozorovat, že HSC zvětší podíl tepla odváděného třískou, takže klesá tepelné namáhání nástroje, přestože pracuje při vyšších teplotách než v případě konvenčního obrábění. [5, 7]

Důvodem zahřívání místa kontaktu ostří a obráběného povrchu je samozřejmě tření. Hodnota tření závisí na vzájemné kluzné rychlosti mezi ostřím nástroje a třískou. Pro nízké řezné rychlosti převažuje suché tření, jehož hodnota je poměrně vysoká, při vyšší rychlosti vzniká kapalná roztavená vrstva, která snižuje koeficient tření. Můžeme konstatovat, že v místě kontaktu ostří s povrchem součásti může teplota přesáhnout hodnotu teploty tání obráběného materiálu, zatímco v jeho okolí se teplota příliš nemění. [22, 23]

Teplota třísky prudce roste pro malé hodnoty posuvu na zub. Pokud posuv na zub není větší než poloměr špičky nástroje, nedochází k odebírání materiálu, čili břit nástroje pouze tře o materiál, což způsobuje enormní

zahřívání. Pro $f_z = 0,025$ mm/zub teplota vzroste až na hodnotu teploty tání. Potom zde hrozí nebezpečí, že se tříska svaří znovu k součásti. Od $f_z = 0,05$ mm/zub je již zahřívání součásti dostatečně nízké na to, aby nedocházelo k tepelným deformacím součásti. [23]

Vlastní řez při vysokorychlostním obrábění u většiny materiálů probíhá tzv. adiabatickým stříhem, jedná se o tepelné-mechanický proces, který oddělí třísku od obrobku [20, 22]. Adiabatický děj proběhne tak rychle, že se tepelná výměna s okolím ani nestihne uskutečnit. [24] Není to ovšem případ hliníkových slitin. Hliník má totiž natolik vysokou tepelnou vodivost, že k tepelné výměně stihne dojít. [16]

3.3.4 Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění dvou hliníkových slitin

3.3.4.1 Slévárenská slitina ISO AlSi7Mg

Praktický experiment vysokorychlostního frézování slévárenské slitiny hliníku A356 (ISO AlSi7Mg) povlakovaným slinutým karbidem popsany v [16] říká, že až do řezné rychlosti 5200 m/min vzniká plynulá tříska bez ohledu na to, zda bylo použito řezné kapaliny či frézování probíhalo za sucha. Nedocházelo ani k adiabatickému stříhu. S rostoucí řeznou rychlostí a rostla i hodnota součinitele přechování třísky až do řezné rychlosti 5000 m/min. Po překročení této rychlosti už hodnota součinitele klesala s rostoucí rychlostí. [16]

3.3.4.2 Tvářená slitina AW EN 7075

Kniha [20] mluví o experimentu, který porovnává tvorbu třísky tepelně zpracované hliníkové slitiny AW EN 7075 v různém stádiu vystárnutí. U správně vystárnutého materiálu byla tříska sice dělená, ale nacházely se zde i spojitě oblasti, takže nelze říci, že tříska byla systematicky dělená. Toto chování bylo prakticky nezávislé na řezné rychlosti. [20]

V případě přestárlého materiálu při použití nejrychlejších řezných podmínek $v_c = 7000$ m/min, $f_z = 0,4$ mm byla primární střížná deformace homogenní a neobjevily se žádné známky fragmentace třísky.

U nedostárlého materiálu při $v_c = 1000$ m/min, $f_z = 0,2$ mm, vznikají stopy střížných rovin přibližně pod úhlem 60° , takže tříska se začínala dělit. Při $v_c = 7000$ m/min, $f_z = 0,4$ mm byla již tříska dělená úplně.

Tento příklad velmi dobře demonstruje, že tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění hliníkových slitin velmi záleží na druhu tepelného zpracování dané slitiny, jelikož tepelné zpracování mění mikrostrukturu. [20]

4 SILOVÉ ZATÍŽENÍ A KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU

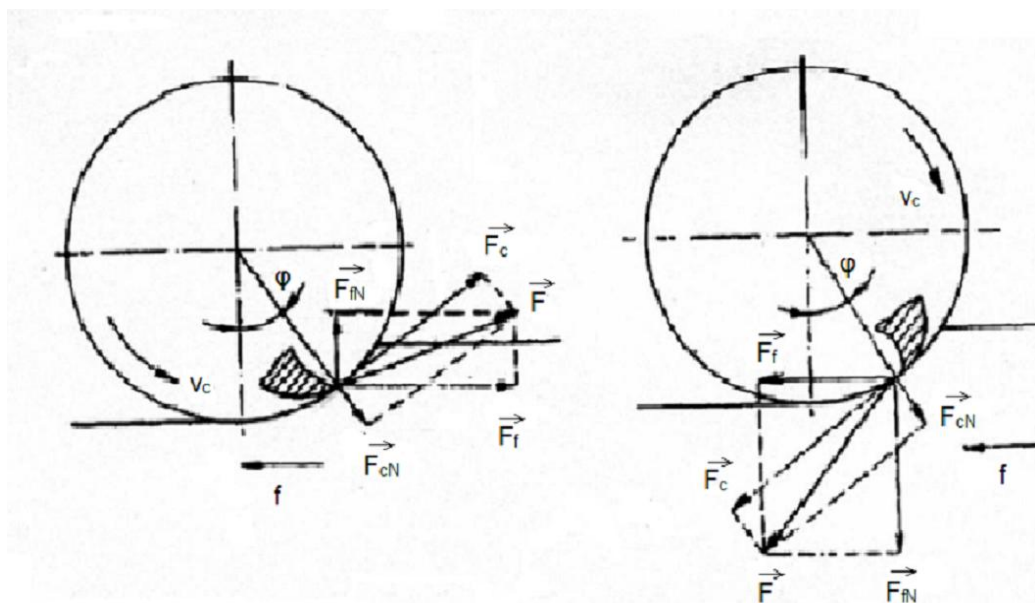
4.1 Řezné síly

Řezné síly způsobují namáhání nástroje. Při HSC se snažíme dosáhnout co nejmenších hodnot řezných sil. Nižší hodnota řezných sil znamená menší požadavky na výkon stroje, prodlužuje životnost nástroje, zlepšuje tvorbu třísky, čímž se zlepšuje kvalita povrchu. Pojem řezné síly lze upřesnit rozdělením vektoru F do jednotlivých směrů (obr. 3.1). Základními složkami jsou řezná síla F_c , posuvová síla F_f a pasivní síla F_p , přičemž řezná a posuvová síla mají ještě své normálové složky F_{cN} a F_{fN} . V zahraniční literatuře se můžeme setkat s rozdělením síly na složku tečnou, radiální a axiální (F_t , F_r , F_a). [1, 5, 6]

Řezné síly jsou samozřejmě ovlivňovány nejrůznějšími parametry řezného procesu. Důležitá je hodnota úhlu čela, úhlu nastavení hlavního ostří a také řezné podmínky jako řezná rychlost, posuv na otáčku (posuv na zub při frézování), či axiální šířka řezu. [1]

4.1.1 Komponenty řezné síly

Při frézování působí F_c v tečném směru na hlavní pohyb nástroje, její normálová složka F_{cN} ve směru kolmém na tento pohyb. Posuvová síla F_f působí rovnoběžně se směrem posuvu, normálová složka posuvové síly kolmo ke směru posuvu (obr. 4.1).



Obr. 4.1 – Schéma sil působících při nesousledném (vlevo) a sousledném frézování (vpravo) [17,18]

Řezná síla se vyjádří vztahem

(4.1)

$$F_c = K_c \cdot A_D [17,18]$$

je tedy závislá na měrné řezné síle a průřezu třísky, který je při frézování nekonstantní. Proto je lepší vyjádřit elementární části řezné síly (rovnice 4.2 a 4.3), které berou v potaz okamžitý průřez třísky.

(4.2)

$$dF_{c,jl} = K_{te} ds + K_{tc} h_{jl} dz [6]$$

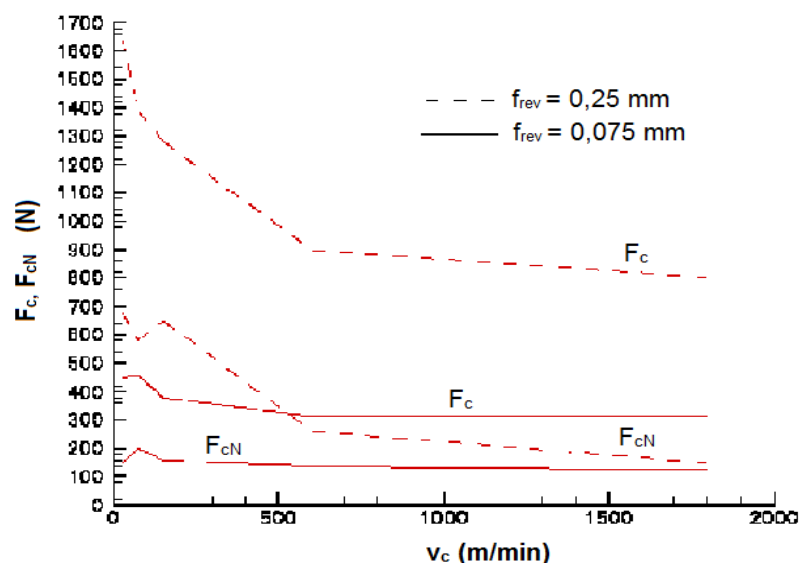
(4.3)

$$dF_{cN,jl} = K_{re} ds + K_{rc} h_{jl} dz [6]$$

Elementární řezná a řezná normálová síla F_c a F_{cN} pro každý zub frézy j a každý osový prvek l , jsou vyjádřeny pomocí specifického řezného tlaku K_c a koeficientů vlivu ostří K_e , okamžité tloušťky třísky h_{jl} , elementární šířky třísky dz a elementární část oblouku trajektorie břitu ds . [6]

4.1.2 Vliv řezné rychlosti

Řezná síla klesá se vzrůstající řeznou rychlostí (obr. 4.2). Tento fakt byl základem myšlenky používání HSC. Vliv řezné rychlosti na velikost jednotlivých složek řezných sil při HSC má na rozdíl od konvenčních způsobů zásadní charakter. Zvyšování řezné rychlosti zvýší teplotu v místě kontaktu, což provede lokální tepelné zpracování obráběného povrchu, vedoucí ke snížení pevnosti. Nižší pevnost snižuje řezný odpor, a tím dochází k razantnímu poklesu řezných sil. Klesající závislost řezné síly na řezné rychlosti však není nekonečná. Podle [26] řezné síly po dosažení určitého minima opět podstatně rostou, a to postupně až nad hodnoty naměřené při konvenčních řezných rychlostech. Důvodem je rovněž lokální tepelné zpracování povrchu, které ovšem v tomto případě vede k jeho vytvrzení. Pokud by se tak stalo, tak HSC ztratí svou výhodu spočívající ve snižování řezné síly a stane se z ekonomického hlediska ztrátovým. [6, 20, 23, 26]



Obr. 4.2 Graf závislosti řezné síly na řezné rychlosti při soustružení hliníkové slitiny 6061 při $f_{rev} = 0,25$ mm/ot a $f_{rev} = 0,075$ mm/ot [27]

4.1.3 Vliv ostatních parametrů procesu

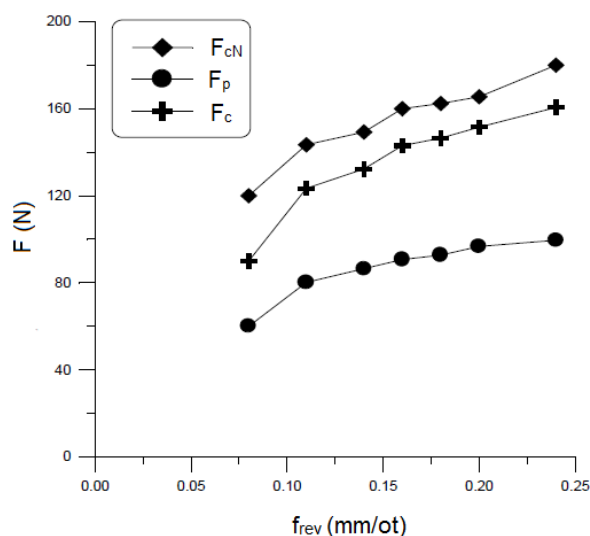
U vysokorychlostního obrábění je vliv posuvu a axiální šířky řezu podobný s jejich vlivem při konvenčním obrábění. Opět platí, že se zvětšujícím se posuvem a šířkou řezu roste velikost jednotlivých složek řezné síly (obr. 3.3, obr. 3.4). „Dokonce při dvojnásobném zvýšení posuvu se takřka zdvojnásobí řezná síla [6].“ S poklesem axiální šířky řezu na velmi malé hodnoty výrazně roste měrná řezná síla. Větší hodnota úhlu čela snižuje řeznou sílu, protože usnadní odvod třísky. [6, 26, 29]

Naopak skutečnost, zda tříška vzniká soudržná či dělená nijak neovlivňuje řeznou sílu. [6, 20, 26]

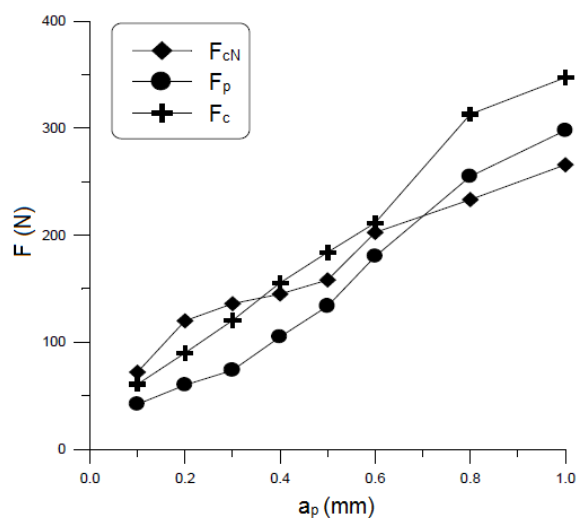
Neoptimálnější úhel čela pro frézování tvářených hliníkových slitin je 12° - 15° . [23, 28] Úhel hřbetu by měl být větší než 10° , protože vysoká teplota a s ní spojená tepelná roztažnost by při menší hodnotě úhlu hřbetu mohly způsobit tření mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje. Proto se hliníkové slitiny obrábí nástroji s úhlem hřbetu 20° - 25° . [28]

Úhel nastavení ostří nemá téměř žádný vliv na řeznou ani na normálovou řeznou sílu, za to zvětšení tohoto úhlu zvyšuje pasivní sílu. [23]

Řezné kapaliny se při HSC nepoužívají za účelem chlazení. Protože ochlazení místa kontaktu by zvýšilo měrnou řeznou sílu, což by prakticky popřelo podstatu HSC. Pokud se řezné kapaliny používají, tak jen ve velmi malém množství a pro svůj mazací účinek, který vede ke snížení řezných sil. [1, 16, 28]



Obr. 4.3. - Graf závislosti sil na posuvu při soustružení legované oceli 100Cr6 při $V_c = 120$ m/min, $a_p = 0,2$ mm [29]



Obr. 4.4 - Graf závislosti síly na axiální šířce řezu při soustružení legované oceli 100Cr6 při $v_c = 120$ m/min, $f_{rev} = 0,08$ mm/ot [29]

4.1.4 Vliv materiálu obrobku

Při srovnání testů v [26] na třech různých materiálech (ocel ČSN 12 050, hliníková slitina ČSN 42 4222 (AW EN 7075) a nástrojová ocel 19 556.4) bylo zjištěno, že ocel 12 050 dosáhla minimální hodnoty F_c při $v_c = 2000$ m/min (což odpovídá 80%) její hodnoty při konvenční v_c , Al slitina zaznamenala minimum F_c při $v_c = 3400$ m/min (70%) a nástrojová ocel při $v_c = 1250$ m/min (60 %).

„U oceli ČSN 12 050 byla při $v_c = 6000$ m/min dosažena velikost složky řezné síly F_c stejná jako při (konvenční) $v_c = 250$ m/min, u oceli ČSN 19 556.4 dokonce již při $v_c = 1850$ m/min a u Al slitiny do měřených $v_c = 6000$ m/min konvenční velikosti řezné síly dosaženo nebylo.“ Pro obě dvě oceli je třeba použít nižších v_c než výše zmíněných, naopak pro hliníkovou slitinu je možné překročit hodnotu $v_c = 6000$ m/min. [27]

Dle tabulky 4.1, která porovnává hodnoty měrných řezných sil pro obrábění materiálů 6061 a 7075, a dle vztahu 3.1 je zřejmé, že při obrábění slitiny 7075 vznikají v primární a sekundární střižné zóně větší řezné síly a vyšší teplota.

Tab. 4.1 – Porovnání měrných řezných sil dvou hliníkových slitin [25]

Koeficienty	K_{tc}	K_{te}	K_{rc}	K_{re}
6061 – T6	243, 77	7, 53	113, 5	7, 83
7075 – T6	600, 46	17, 90	180, 96	20, 42

K_{tc} a K_{rc} jsou měrné řezné síly v tečném a radiálním směru vzniklé stříhem. K_{te} a K_{re} jsou měrné řezné koeficienty vlivu ostří v tečném a radiálním směru.

4.2 Kvalita obrobeného povrchu

4.2.1 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu

Při vysokorychlostním obrábění je možné dosáhnout kvality povrchu srovnatelné s broušením. Průměrná aritmetická úchylna profilu může být rovna až $1 \mu\text{m}$. Kvalita povrchu může být obecně vylepšena použitím řezné kapaliny, konkrétně při rychlosti posuvu mezi 3000 a 6000 mm/min řezná kapalina může zlepšit kvalitu povrchu až o 20 %. [23]

Kvalita povrchu je ovlivněna více faktory: posuvem, poloměrem špičky, úhlem čela, úhlem hřbetu, řeznou rychlostí. Je zde určitá analogie se silami. Parametry, které zvyšují řeznou sílu, obecně zhoršují drsnost povrchu. Při sousledném frézování je kvalita povrchu lepší než při nesousledném. Pro dosažení dobré kvality povrchu je také důležitá celková tuhost stroje. Dále obrobek i nástroj musí být spolehlivě upnuty, aby nedocházelo k nežádoucímu zvyšování posuvu, což má negativní vliv na drsnost povrchu. [28]

U HSC však vstupuje do hry další faktor, a to vibrace. Při HSC se pohybujeme v mnohem větších rychlostech než při konvenčním obrábění, působí zde větší odstředivé síly, takže vibrace jsou větší. Proto je třeba dobře ovládnout tento jev, jelikož má u HSC zásadní vliv na kvalitu povrchu, a také na životnost nástroje. [5, 28]

4.2.2 Vibrace

4.2.2.1 Základní rozdělení vibrací

Vibrace neboli kmitání se dělí na vynucené a samobuzené. „Vynucené kmitání je vyvoláno periodicky proměnlivými silami. Vynucené kmitání může vzniknout periodickou změnou průřezu třísky nebo nevyvážeností rotujících hmot. Frézování je typickým příkladem periodického namáhání, řezné síly se mění a způsobují vynucené vibrace. Samobuzené kmitání bezprostředně souvisí s řezným procesem a jeho nestabilitou, takže tento typ vibrací je velice pečlivě analyzovaný při určování řezných podmínek pro HSC. Tyto vibrace rozpoznáme i sluchem podle charakteristického zvuku (vysoké frekvence), či zrakem podle stop na povrchu obrobené plochy. [5, 6, 17, 18]

Vždy se snažíme, aby byl obráběcí proces co nejstabilnější, což ovšem neznamena nepřítomnost vibrací. Je třeba tedy dobře nastavit otáčky vřetene, aby byl obráběcí systém stabilní a nedocházelo k velkému rozkmitání obráběcího systému kvůli samobuzeným vibracím. Tento jev bývá analyzován takzvanými diagramy stability (stability lobe diagram). [5, 6]

Vliv vibrací je závislý na celém obráběcím systému stroj-nástroj-obrobek. Chování systému je charakterizováno 3 parametry: ekvivalentní hmotnost, tuhost a schopnost tlumení vibrací. Toto chování vyjadřuje následující diferenciální rovnice 4.4.

$$m \cdot y''(t) + c \cdot y'(t) + k^* \cdot y(t) = F_y(t) \quad [5] \quad (4.4)$$

4.2.2.2 Vliv vibrací na řezný proces

Obráběcí systém nikdy není dokonale stabilní. A proto část, která je méně pevná (buď nástroj nebo obrobek), podléhá deformaci, což negativně ovlivňuje tloušťku třísky a drsnost povrchu. Při vibracích se materiál obrobku či nástroje vychyluje a na základě tohoto jevu mohou vzniknout 3 modelové situace: [5]

- a) profil obráběného povrchu plynule navazuje na povrch obrobený předchozím zubem. Tloušťka třísky je stejná při záběru každého zubu frézy. Systém je považován za stabilní. [5]
- b) profil obráběného povrchu nenavazuje plynule na povrch obrobený předchozím zubem. Reakce systému na mírnou změnu řezných sil má vliv na tloušťku třísky, která není konstantní při záběru každého zubu. Dochází k nežádoucím vibracím, systém je tedy nestabilní. [5]

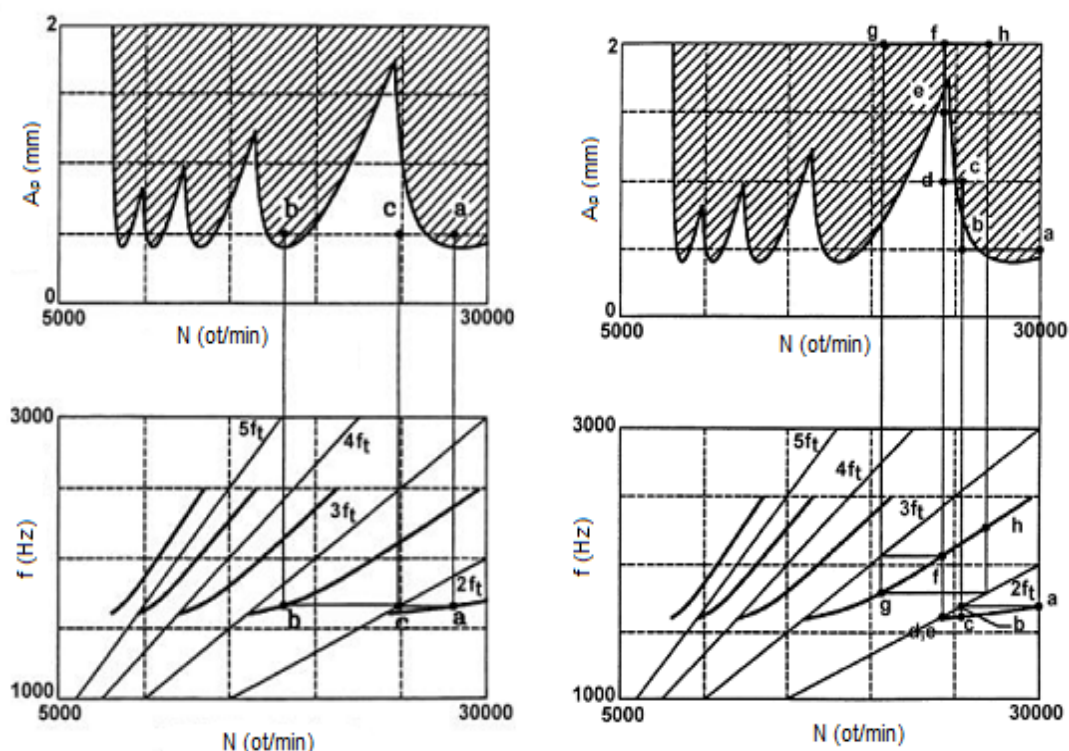
- c) profil obráběného povrchu je posunut o polovinu vlny. Řezné síly se mění velmi prudce. Ostří je totiž v určitém okamžiku v plném záběru a jindy zcela mimo materiál. Tento jev je naprosto nežádoucí. Tloušťka třísky je zcela nepravidelná, kvalita povrchu je tedy nevyhovující, amplituda vibrací je čím dál tím větší a navíc dochází k namáhání nástroje i stroje šoky. [5]

4.2.2.3 Stability lobe diagram

Stability lobe diagram je anglický termín pro diagram určující stabilní a nestabilní zónu HSC na základě rychlosti otáček vřetena a axiální šířky řezu. Rozdíl v kvalitě povrchu při obrábění ve stabilní a nestabilní zóně je markantní (viz obr. 4.5). Definování hranice stability probíhá pomocí softwarů, a to řešením diferenciální rovnice (4.1) a Fourierových transformací.

Z hlediska produktivity výroby se v diagramu snažíme dostat co nejvíce doprava a nahoru, tzn. dosáhnout co největší axiální šířky řezu a co nejvyšších otáček, potažmo řezné rychlosti a zároveň zůstat ve stabilní oblasti.

Tento diagram nám nedává žádnou informaci o amplitudě vibrací. Takže i když stanovíme řezné podmínky nacházející se pod křivkou, tedy ve stabilní oblasti, mohou být výsledky obrábění (např. kvalita povrchu) špatné, protože amplituda vibrací může být vysoká. [5]



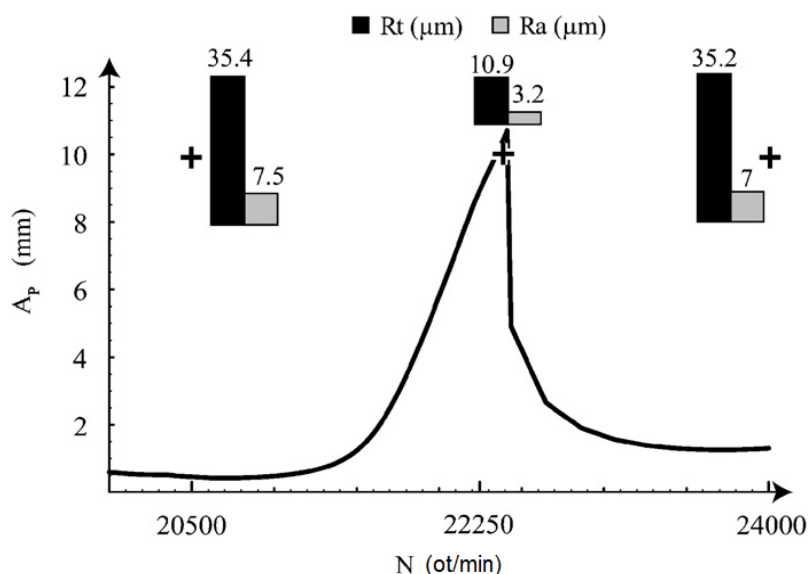
Obr. 4.5 Stability lobe diagram [5, 19]

Ve spodní části diagramu vidíme frekvenci v závislosti na rychlosti rotace vřetena, jejímž výsledkem jsou křivky znamenající násobky frekvence záběru zubu. Horní část diagramu rozlišíme na 2 části. Bílá oblast je stabilní, šrafovaná část je oblast nestabilního chování.

Pomocí iterační optimalizace se snažíme najít nejvhodnější kombinaci otáček a šířky řezu. Diagramy vlevo znázorňují první iteraci. Body a, b se nacházejí v nestabilní oblasti, bod c již je přijatelný, ale šířka řezu $a_p = 0,5$ mm je zbytečně malá, tak přistoupíme k další iteraci, tj. diagramy vpravo. Zde vidíme, postupné zvyšování šířky řezu při již vybraných otáčkách. Nejvhodnější je bod e ($n=24\,000$ ot/min, $a_p = 1,5$ mm). Bod f, nacházející se v nestabilní oblasti, indikuje že $a_p = 2$ mm už je příliš velká. V místech, kde stabilní oblast vystupuje do velkých axiálních šířek řezu, je celočíselný násobek frekvence průchodu dvou následujících zubů frézy shodný s vlastní frekvence nástroje. Jedná se o modelovou situaci a) z kapitoly 4.3.2.2. Je to paradoxní, jelikož při rezonanci je hodnota řezné síly F_c nejvyšší [MC HSM], ale kvalita povrchu bude nejlepší. Tento diagram je velice teoretický, protože pracuje s hypotézou, že se bude deformovat pouze buď nástroj, nebo obrobek a druhý z nich zůstane stabilní. V praxi situace záleží na mnoha faktorech. Navíc tato teorie platí pouze do určité míry. Velká řezná síla způsobuje velké namáhání nástroje a stroje a může způsobit nevratnou deformaci součásti či nástroje. [5]

4.2.2.3.1 Vliv vibrací na kvalitu povrchu

Vliv vibrací na drsnost povrchu můžeme vidět na obr. 4.6, což je zjednodušená forma diagramu stability. Tento diagram z [30] demonstduje výsledky experimentu HSC tenkostěnné součásti z hliníkové slitiny 2017A, čili duralu. Křivka v diagramu odděluje stabilní a nestabilní oblast.



Obr. 4.6 – diagram stability a porovnání drsností povrchu tenkostěnné součásti z duralu při různých hodnotách otáček vřetena a $a_p = 10$ mm [30]

Z diagramu je patrné, že 22 250 ot/min a $a_p = 10$ mm se nachází těsně pod hranicí stability, tedy ideální kompromis mezi produktivitou výroby a kvalitou povrchu. Při použití této rychlosti rotace dosáhneme více než dvakrát lepší hodnoty R_a . Zatímco pro otáčky 20 500 a 24 000 ot/min bychom museli pro dosažení stabilní oblasti snížit šířku řezu více než desetkrát. Pokud je poměr R_t a R_a menší než 3, svědčí to o dobré kvalitě povrchu. [30]

Význam diagramů stability spočívá v určení stabilních oblastí, podle nichž se později snažíme nastavit řezné podmínky. Při otáčkách nebo řezné rychlosti ve stabilních oblastech dosáhneme výrazně lepší drsnosti povrchu než při otáčkách v nestabilní zóně, a to při shodné axiální šířce řezu. Pohled z druhé strany je možnost zvýšit několikanásobně šířku řezu ve stabilní zóně, abychom dosáhli stejné drsnosti povrchu jako při původní šířce řezu v nestabilní zóně. Tato výhoda výrazně zvyšuje MRR, takže zvyšuje produktivitu obrábění. [5, 30]

5 POŽADAVKY NA CNC ŘÍZENÍ A PROGRAMOVÁNÍ

Moderní obrábění se již neobejde bez CNC řízení. CNC řízení umožňuje obrobít složité plochy, automatizovat výrobu a tím přispět k jejímu zefektivnění. CNC obrábění se skládá ze 3 částí: výpočet dráhy nástroje, vykonání trajektorie NC řízením, vlastní obrábění. První 2 části probíhají řekněme virtuálně, třetí reálně. Návaznost a kompatibilita těchto 3 kroků je velmi důležitá. Vygenerovaná trajektorie by měla být taková, aby ji příslušný řídicí systém CNC stroje dokázal zpracovat s dostatečnou přesností. Pokud tomu tak není, vznikají nepřesnosti ještě před započítím samotného obráběcího procesu. Stejně tak trajektorie zpracovaná řídicí jednotka by měla být přizpůsobena parametrům stroje. Na samotný obráběcí stroj jsou při HSC, kladeny velmi vysoké nároky, ať jsou to technické parametry motoru a vřetena, či celková tuhost stroje, která přispívá k dosažení požadované přesnosti. [5, 7]

5.1 Proces vytváření geometrie nástroje

5.1.1 Postup vytváření geometrie nástroje



Obr. 5.1 – Schéma programovacího řetězce [5]

V dnešní době jsou CAD/CAM systémy používány velice často. Zvláště simulace CAM je vhodným pomocníkem. Vizualizace obráběcího procesu usnadňuje představivost, což minimalizuje riziko chyby lidského faktoru při programování.

Pomocí CAD systému vytvoříme 3D model součásti. CAM systém umožňuje naplánovat (naprogramovat) a popsat obrábění jednotlivých ploch konkrétními nástroji. Důležitý mezikrok je tzv. Post Procesor, který přepíše matematicky popsanou trajektorie nástroje do programovacího jazyku stroje. CNC stroj převezme program z Post Procesoru a může začít vlastní proces obrábění. Důležité je, aby jednotlivé kroky byly kompatibilní. [5]

5.1.2 Typy geometrie nástroje

Programovací softwary CNC definují dráhu nástroje pomocí matematických funkcí: Dnes jsou používány tři druhy interpolací: lineární, kruhová a polynomická. [5, 7]

5.1.2.1 Lineární interpolace

Je velmi jednoduchá na nastavení. Trajektorie nástroje je programovaná v podobě lomené čáry. Čím jsou jednotlivé části lomené čáry menší, tím se více blížíme k teoretické křivce a tím menší je chyba. Jsou-li však jednotlivé úseky příliš malé, program obsahuje příliš mnoho dat a navíc nastavená přesnost není reálně dosažitelná. Je třeba tedy najít rozumný kompromis. [5]

5.1.2.2 Kruhová interpolace

Nástroj se pohybuje po kruhových obloucích. Některé systémy jsou schopny používat kruhovou interpolaci i ve 3D. Tento typ programování není příliš často používán, jelikož má omezené pole působnosti. [5]

5.1.2.3 Polynomická interpolace

Jedná se o nejmodernější způsob optimalizace. Dráha nástroje je pro každý úsek obráběného povrchu určena pomocí polynomické funkce až třetího řádu. Tyto polynomy jsou nazývané spline křivky. Je třeba ovšem dbát na to, aby jednotlivé polynomy na sebe plynule navazovaly. Výhodou polynomické interpolace je její plynulá trajektorie bez velkých nepravidelností. Akcelerace nástroje není nijak prudká, takže nevznikají zbytečné šoky či vibrace. Tento typ řízení je velmi vhodný k obrábění složitých tvarů. [5, 7]

5.1.3 Interpolační chyba

Vzdálenost každých dvou bodů musí dosahovat požadované přesnosti. Vždy existuje tzv. interpolační chyba (rozdíl mezi teoretickou a skutečnou křivostí). Pokud je tato chyba příliš velká, je třeba přidat lokální body. Tato operace je však časově náročná na výpočet. Naštěstí u polynomické interpolace nevzniká velká nepřesnost příliš často, jak tomu je u interpolace lineární, takže se obvykle chyba kontroluje pouze v kritických místech, kde je velká pravděpodobnost, že nepřesnost bude značná. Tento postup zabraňuje tomu, aby počet bodů byl příliš vysoký, a navíc šetří čas při výpočtu.

Někdy se rovněž používá aproximace, která může snížit interpolační nepřesnost nebo zjednodušit trajektorii. [5]

5.2 5ti-osé obrábění

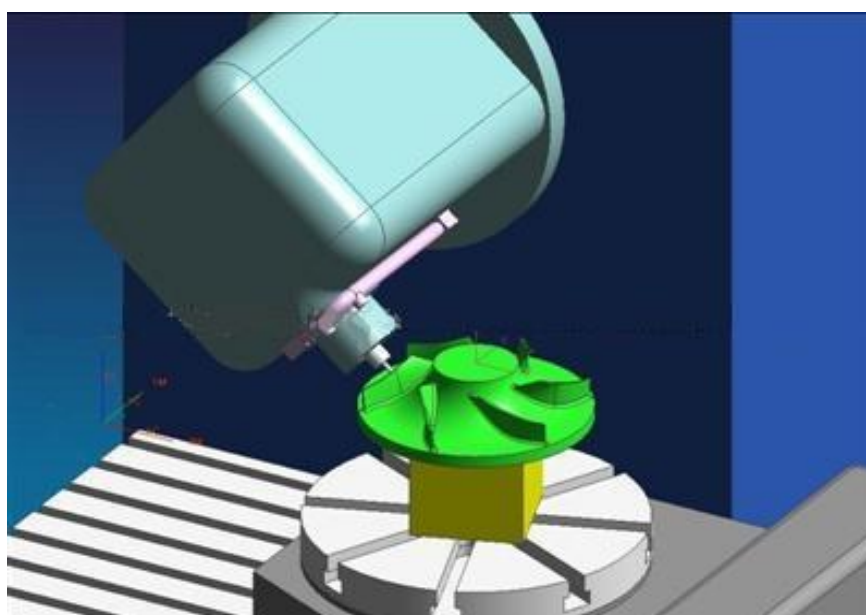
5.2.1 Charakteristika 5ti-osého obrábění

Používá se na obrábění složitých tvarů, a také na obrábění součástí nemožných vyrobit na 3-osém stroji bez vyjmutí a změny polohy součástí. Je

to ovšem postup složitý po všech stránkách, takže občas čelíme problémům s programováním matematicky složitých křivek či spolehlivostí křivek. [5, 7]

5 os: X, Y (radiální posuvy), Z (axiální posuv), C (úhlové natočení podél osy Z), A (úhel natočení vřetene o 30° v každém směru od vertikální polohy). [5]

Při druhé fázi programovacího řetězce (obr. 5.1), tj. CAM, dochází k výpočtům trajektorie. Ve třetí fázi, post processor, je matematicky popsaná trajektorie překládána do programovacího jazyku konkrétního CNC stroje. Trajektorie nástroje musí být naprogramována tak, aby byly obrobena všechny požadované plochy, přičemž je třeba dbát na to, aby se stopka nástroje nikdy nedotýkala součásti. [5]



Obr. 5.2 Ukázka CAM vizualizace 5ti-osého obrábění [31]

5.2.2 Optimalizace trajektorie

Modelizace trajektorie probíhá téměř výhradně v CAD/CAM systémech. Výpočet touto metodou není vždy zcela dostatečný, takže se provádí různé optimalizace za účelem plynulosti trajektorie a zkrácení času. Čím je dráha složitější, tím hůř je realizovatelná z mechanického a geometrického hlediska. Naopak při správně zvolené optimalizaci trajektorie můžeme snížit strojní čas až o 40% při zachování téměř stejného posuvu. [5]

5.2.2.1 Pravidla pro optimalizaci dráhy nástroje

- každý následující krok by měl co nejlépe kopírovat krok předchozí, aby záběr nástroje byl všude stejný

- vyvarovat se geometrických nespojitostí, jelikož nespojitosti způsobují zpomalení posuvové rychlosti
- maximalizovat poloměry křivosti, což umožňuje dosáhnout větší plynulosti a posuvové rychlosti. [5]

5.2.3 Rozdělení 5ti-osého obrábění podle účelu

5.2.3.1 Produktivita

Hlavní je rychlé odebrání materiálu, takže se snažíme naplánovat trajektorii tak, abychom co nejvíce využili možností, které nám 5ti-osé obrábění nabízí, pro ušetření strojního času. Přesnost v tomto případě nehraje primární roli. Obecně je tento způsob velmi častý pro obrábění součástí trupu letadel. Typickým příkladem operace tohoto druhu je vyhloubení kapsy. [5]

5.2.3.2 Přesnost

Druhý způsob je užíván pro obrábění turbínových a jiných lopatek. Parametry, které nás zde zajímají nejvíce, jsou přesnost a kvalita povrchu, jelikož jsou důležité pro funkčnost stroje, do kterého budou namontovány. Použití 5ti-osého stroje je pro tento typ součástí nutný kvůli složitosti tvaru. Rychlost odebrání materiálu je v tomto směru až na druhém místě. [5]

5.2.4 Krátké srovnání 5ti-osého obrábění s 3-osým

Závěrem můžeme říci, že 5ti-osé obrábění není ve většině případů ekonomicky výhodnější než klasické 3-osé, klade však velké nároky na matematické znalosti obsluhy. Na druhou stranu jsou výsledky obrábění lepší než u 3-osého, ať už co se týče strojního času nebo kvality povrchu. Navíc na 5ti-osých strojích lze vyrobit součásti, jejichž obrábění není možné na 3-osých strojích. [5, 7]

5.3 Požadavky kladené na CNC obráběcí stroje

5.3.1 Druhy CNC strojů

Číslicově řízené stroje se liší podle prováděné obráběcí metody. Existují CNC soustruhy, vrtačky, frézovací stroje atd. Poté existují stroje specializované na HSC, které disponují vysokou rychlostí rotace včetně posuvu. Mimo to známe ještě víceosá obráběcí centra, která jsou uzpůsobena pro HSC a zároveň nahradí jednotlivé obráběcí metody. [7]

Jelikož požadavky na přesnost a produktivitu výroby se stále zvyšují, obráběcí centra jsou užívány stále více. Disponují totiž dostatečnou tuhostí

stroje, vysokým výkonem stroje a také systémem automatické výměny nástrojů, která zkrátí celkový čas. [7]

5.3.2 Technická charakteristika strojů pro HSC

U CNC strojů pro HSC bývá požadována vysoká přesnost, vysoká rychlost otáček vřetena, vysoká rychlost posuvu a z toho plynoucí velký výkon. Technické parametry moderních CNC strojů se mohou řádově pohybovat okolo rychlosti otáček vřetena 60 000 ot/min, výkonu 80 kW, pracovní posuvové rychlosti 60 m/min a rychlosti rychloposuvu 100 m/min. Pro pohon na posuvu je použití nejčastěji servomotorů a kuličkových šroubů. U vřetena je požadována velká tuhost. Náhon vřetena bývá realizován prostřednictvím digitálního servopohonu, tzv. elektrovřeteno. Vysoká rychlost vřetena velmi namáhá ložiska, ve kterých je uloženo. Pokud je použito kuličkových ložisek, tak vřeteno může dosáhnout rychlosti až 40 000 ot/min při výkonu 40 kW. Jiná možnost je uložení v magnetických ložiskách. Takto uložená vřetena mají umožňují dosáhnout výkonu 20 kW při 45 000 ot/min nebo 15 kW při 60 000 ot/min. HSC klade velké nároky na upínací systém nástroje. Pro dosažení přesnosti je třeba zabránit házení nástroje a umožnit přenést velký krouticí moment. Standardní upnutí jsou použitelné asi do 10 000 ot/min. Při rychlosti rotace vřetena nad 10 000 ot/min se používají 2 hlavní systémy upnutí nástroje: strmý kužel ISO s kuželovitostí 7:24 či krátký kužel HSK s kuželovitostí 1:10. Nástroj se do kužele upíná buď mechanicky (kleštinou), hydraulicky nebo nalisováním za tepla. V neposlední řadě musí mít stroje dobře vyřešený systém odvodu třísek z pracovního prostoru. [5, 7, 32]

5.3.3 Příklady CNC strojů pro HSC

5.3.3.1 Obráběcí centrum Mikron HPM

Společnost GF AgieCharmilles představila v roce 2007 řadu tříosých obráběcích center Mikron HPM. Tato tříosá obráběcí centra jsou díky své robustní konstrukci předurčena pro vysokovýkonné obrábění. Jeho největší verze disponuje zásobníkem až pro 220 nástrojů s časem výměny kratším než 2 vteřiny. Vřetena jsou vybaveny systémem vnitřního chlazení a maximálními otáčkami 15 000, 20 000, 30 000 nebo 42 000 min⁻¹. [33]



Obr. 5.1 Tříosé obráběcí centrum Mikron HPM určené pro HSC [33]

5.3.3.2 Obráběcí centrum Millac 1000VH

5ti-osé obráběcí centrum Millac 1000VH od firmy Okuma dokáže vysokorychlostně obrábět i složité součásti s vysokou přesností. Rozsah naklonění vřetena je 150° s přesností na jednu tisícinu stupně. [34]

Tab. 5.1 Technické parametry stroje Millac 1000VH [34]

Max. hmotnost obrobku	kg	2 000
Rychlost posuvu v X	mm/min	24 000
Rychlost posuvu v Y	mm/min	24 000
Rychlost posuvu v Z	mm/min	12 000
Rychloposuv v A,C	°/min	1-1 080
Otáčky vřetena	ot/min	100 -10 000
Výkon vřetena	kW	18, 5/22



Obr. 5.2 5ti-osé obráběcí centrum Millac 1000VH [34]

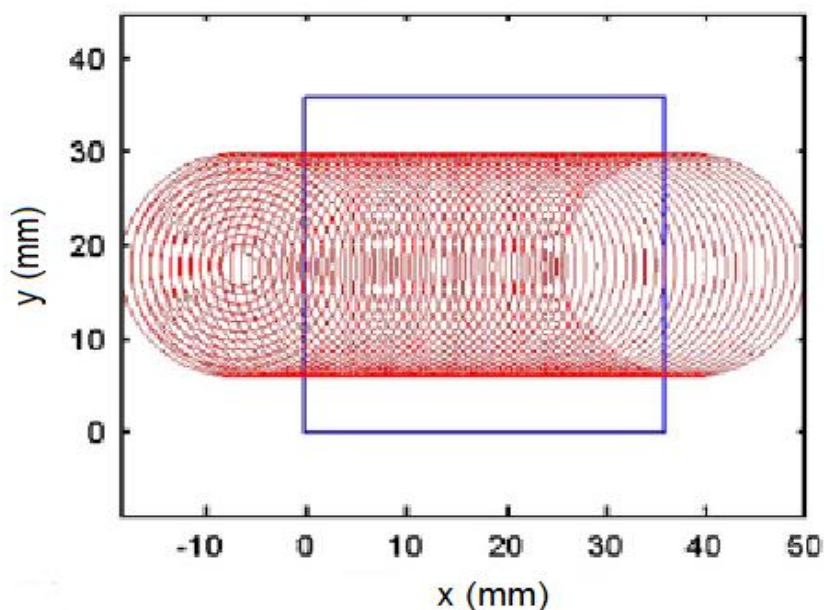
5.4 Velkoobjemové obrábění hliníkových slitin

Odebírání velkého množství materiálu je v leteckém průmyslu velmi časté. Účelem je odebrat co nejvíce materiálu za co nejkratší čas, tedy dosáhnout co největšího MRR. K tomu je potřeba propracovaná trajektorie nástroje za pomoci CNC řízení. Tento požadavek klade nemalé nároky jak na technické parametry obráběcího stroje, tak programování vhodné trajektorie nástroje. Příkladem velkoobjemového obrábění jsou hrubování kapes, odebírání materiálu kolem nejrůznějších kontur a hrubování součástí s tenkými stěnami. [5]

5.4.1 Vybrané hrubovací techniky

5.4.1.1 Trochoidní obrábění

Nástroje se pohybují po trochoidní trajektorii, což je kombinace translačního a rotačního pohybu. Parametry jsou poloměr trochoidy a krok posuvu. Tyto parametry definují objem materiálu odebraného za každou otáčku trochoidy a namáhání nástroje je přímo závislé na nich. Dalšími parametry jsou počet otáček trochoidy k projetí celé trajektorie, tento parametr určuje strojní čas. Při použití této technologie k výrobě drážek, jejich stěny nejsou rovné, ale mají tvar kruhových oblouků. Poloměr kruhového oblouku je definován poloměrem trochoidy a jejich počet či hustota je určen krokem trochoid. Tato technologie je poměrně mladá, průmyslově je využívána asi od roku 2005. Klade poměrně vysoké nároky na CNC řízení a rychlost a akceleraci stroje. Ale na druhou stranu, může být účinně použita se standardními řeznými nástroji, dokáže zvýšit jejich životnost a vykazuje velmi dobré výsledky i při obrábění tvrdých materiálů. [5]



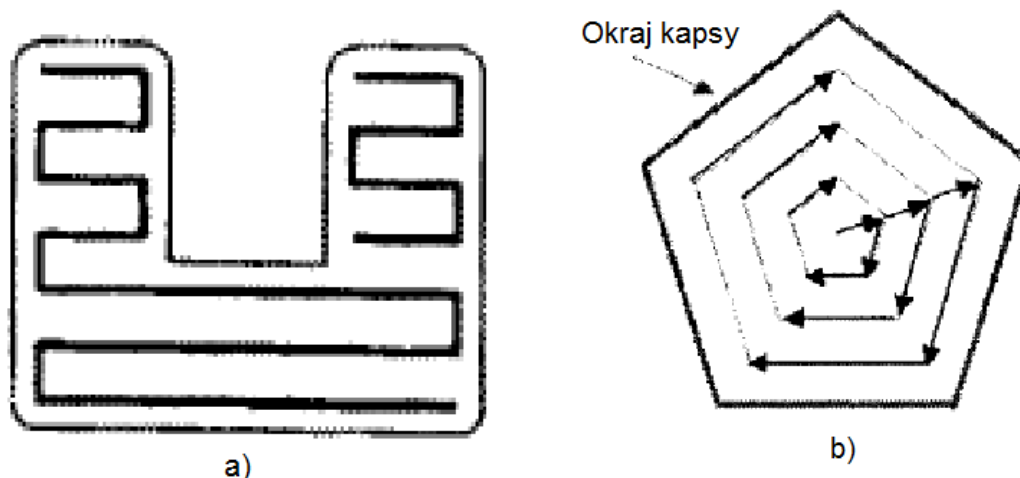
Obr. 5.3 Trajektorie nástroje při trochoidním frézování [35]

5.4.1.2 Axiální zahlubování

Jedná se o poměrně novou metodu obrábění používanou hlavně pro hrubování kapes. Posuvový pohyb je uniaxiální, pouze po ose nástroje. Jedná se vlastně o vrtání více děr. Nástroj samozřejmě mění svou pozici i v jiných osách, ale nikdy ne při záběru do materiálu. Aby byla doba obrábění co nejnižší, snažíme se pro daný tvar najít co nejmenší počet vrtání, který zajistí odebrání materiálu. Výhodou této metody je, že nástroj je používán pouze v směru, ve kterém má největší tuhost. Nástroj je velmi málo namáhán ohybem, což minimalizuje vibrace. Axiální zahlubování zároveň šetří strojní čas až o 30% oproti jiným metodám. Tato operace je využívána jak pro tvrdé, tak pro měkké materiály. U měkkých materiálů, jako jsou například hliníkové slitiny, je možné touto metodou odebrat velké množství materiálu za krátký čas (několik litrů za minutu). [5]

5.4.1.3 Trajektorie zigzag

Zigzag trajektorie (neboli direction-parallel) je průjezd nástroje po přímkách se střídavou změnou směru. Tento typ trajektorie umožňuje dosáhnout relativně vysokých posuvových rychlostí díky delším přímým úsekům na trajektorii. Nevýhodou zigzag trajektorie je, že se postupně střídá sousledné a nesousledné frézování, takže se mění namáhání nástroje a struktura povrchu. Druhou nevýhodou je nutnost optimalizace dráhy v místě změn směru posuvu. Tato technika je výrazně rychlejší než konvenční způsob offset (contour parallel) [6,36]. Offsetové křivky jsou ekvidistanty na řídicí křivku, což je v našem případě okraj kapsy nebo kontury. [5, 6, 36]

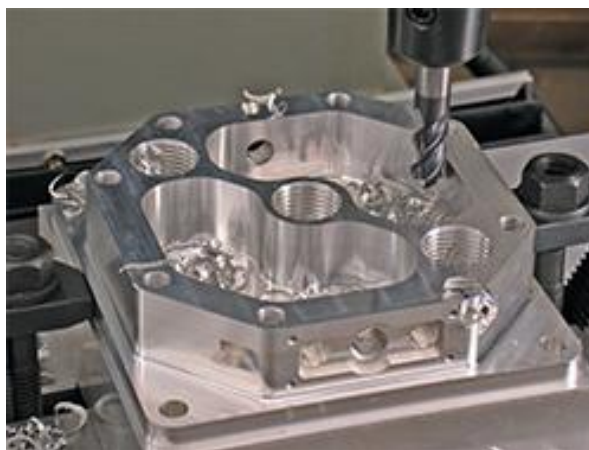


Obr. 5.4 Ukázka trajektorie zigzag a) a offsetových křivek b) [36]

5.4.2 Obrábění typických tvarů součástí pro letecký průmysl

5.4.2.1 Obrábění kapes a kontur

Je to jedna z nejčastějších aplikací vysokorychlostního obrábění v leteckém průmyslu. Problematika u kapes a kontur je prakticky stejná, s tím rozdílem, že kapsy se ještě dělí na uzavřené a otevřené. V případě otevřených kapes a kontur je odběr materiálu jednodušší, protože nástroj může do materiálu vstoupit radiálním posuvem z budoucí otevřené strany. Uzavřené kapsy se musejí nejprve vrtat shora, a teprve poté může nástroj postupovat radiálním posuvem. Při hrubování se snažíme dosáhnout co největší MRR. Důležitým parametrem je strojní čas. Když je kapsa hluboká, tak se vybírá postupně po více rovnoběžných rovinách, aby nástroj nebyl příliš namáhán na ohyb. Dalším faktorem je trajektorie nástroje v jedné horizontální rovině bez ohledu na to, jestli je kapsa otevřená nebo uzavřená, protože rozdíly ve strojních časech při různých trajektoriích mohou být značné. Obvykle se obvod kapsy nebo kontury dokončuje. Je třeba naprogramovat trajektorii tak, aby přídavek na dokončování byl na po celém obvodu konstantní. [5]



Obr. 5.5 Obrábění uzavřené kapsy [37]

5.4.2.1.1 Způsob vstupování nástroje do uzavřené kapsy

Při pouhém vrtání vzniká problém s nulovou řeznou rychlostí na ose nástroje. Vždy je tu problém s odvodem třísky a se zahříváním nástroje. Proto se někdy používají modifikované metody, jako vrtání po šroubovici, kdy se nástroj pohybuje po kruhové trajektorii. Tato modifikace řeší problém s nulovou řeznou rychlostí na ose nástroje a lehce omezuje zahřívání, protože nástroj není stále v kontaktu s již zahřátou plochou. Nástroj může vstupovat do materiálu také pod úhlem (cca 3, 5°). Nástroj je situován kolmo k povrchu, úhel vzniká souběžným radiálním a axiálním posuvem směrem do materiálu. Tento postup snižuje řezné síly. [5, 6]

5.4 2.1.2 Obrábění rohu

Obrábění rohu je klasickým příkladem, kdy je problematické dosáhnout naprogramované rychlosti posuvu. Tento jev často prodlužuje strojní čas oproti předpokladům. Nastává při obrábění kapes či kontur.

Standardně v rohu, kdy nástroj zatáčí o 90°, je v určitém okamžiku v_f nulová, což má negativní vliv na řezný proces a kvalitu povrchu. Tomu se snaží zabránit vhodně zvolená trajektorie, jelikož změny posuvu mají negativní vliv na strukturu povrchu. Prvním krokem je zaoblení trajektorie nástroje v rohu, a to s větším poloměrem křivosti než je rádius nástroje. Poté je vhodné snížit v_f při průjezdu nástroje rohem i v řídicím programu, aby odpovídala reálně dosažitelné hodnotě. Při programování je třeba vzít v potaz i nevyhnutelné akcelerace a zpomalování při náběhu a výběhu rohu. [5, 38]

5.4.2.1.2.1 Porovnání odlišných naprogramování obrábění rohu

Experiment, popsáný v [6], testující vliv 4 různých kombinací v_f a akcelerací a jejich vliv na strojní čas hrubování kapsy trajektorií zigzag:

- a – $v_f = 20$ m/min, akcelerace 1G
- b - $v_f = 20$ m/min, akcelerace 0,5G
- c - $v_f = 1$ m/min, akcelerace 1G
- d - $v_f = 20$ m/min na rovném úseku, $v_f = 1$ m/min při změně směru, akcelerace 1G

Tab. 5.2 Porovnání strojních časů hrubování kapsy při různých řezných podmínkách [6]

Trajektorie	a	b	c	d
Čas (min)	2, 17	2, 50	8, 92	2, 47

Podle tabulky je zřejmé, že způsob c, je nepříjemně pomalý. Varianta a je sice nejrychlejší, ale bude způsobovat problémy v místech změny směru. Jako nejlepší řešení se jeví možnost d, která využije rovných úseků pro rychlý posuv a v komplikovaných místech zpomalí a navíc se strojní čas se příliš nezvětší v porovnání s variantou a. [6]

5.4.2.2 Obrábění tenkostěnných součástí

Obrábění tenkostěnných součástí je velmi častou aplikací HSC v leteckém průmyslu a jedná se o delikátní obor obrábění. Fáze hrubování probíhá stejným způsobem jako u kapes a kontur. Účelem je odebrat přebytečný materiál co nejrychleji. Zde je zajímavé zabývat se dokončovacím obráběním tenké stěny. Ve všech ostatních odvětvích mluvíme o namáhání či tuhosti nástroje, zde musíme mluvit o tuhosti stěny, jež je mnohem nižší v porovnání s tuhostí nástroje. Zatížení stěny je možné snížit střídavým frézováním pokaždé z jedné strany stěny. Obrábění tenké stěny probíhá vždy od volného konce k vetknutí. Účelem tohoto postupu je, aby nikdy nebyl poměr šířky stěny a výšky, které působí nástroj, příliš veliký. Nástroj působí na stěnu zejména ohybovým namáháním. Výhodou HSC při obrábění tenkostěnných součástí je snížení řezné síly oproti obrábění v konvenčních rychlostech, což omezí nežádoucí průhyb stěny a umožní obrábět stěny s velkým poměrem výšky k tloušťce při zachování dostatečné přesnosti a kvality povrchu. Dalším faktorem, který je třeba eliminovat, jsou všudypřítomné vibrace. Když bude nástroj blíže ke kořeni stěny, její ohyb či výchylka na konci bude menší díky větší tuhosti a stabilitě a vibrace nebudou tak značné.

6 ZÁVĚR

Předkládaná bakalářská práce spočívá v teoretickém rozboru problematiky vysokorychlostního obrábění hliníkových slitin pro letecký průmysl. Nebyl proveden žádný praktický experiment. Závěry jsou tedy vyvozené pouze na základě studia literárních pramenů.

Hliníkové slitiny patří mezi poměrně lehce obrobitelné materiály, takže technologie HSC těchto materiálu je již poměrně pokročilá v porovnání s jinými, převážně těžkoobrobitelnými materiály, jako např. slitiny titanu. Je možno obrábět vysokými rychlostmi a dosáhnout značného MRR. Vysoká pořizovací cena a náklady na údržbu vybavení pro HSC jsou vykompenzovány menším opotřebením nástrojů díky nižším řezným silám a hlavně přesností a produktivitou. Diagramy stability nám ukazují paradox, že při kmitání blízkém harmonické frekvenci, kdy je hodnota řezné síly nejvyšší, dosáhneme výborné kvality povrchu, díky shodě času mezi záběrem dvou po sobě jdoucích zubů a násobkem vlastní frekvence nástroje (nebo součásti). Problematika diagramů stability je velmi složitá. Tato práce ji pouze nastiňuje, nezabývá se jí do hloubky.

Vyvíjí se nové technologie hrubování součásti pro zvýšení MRR při zachování co nejnižšího namáhání nástroje. Trochoidní frézování snižuje tepelné namáhání, protože nástroj se ochlazuje po dobu, kdy není v záběru. Axiální zahlubování naopak prakticky eliminuje ohybové namáhání nástroje, díky posuvu probíhajícímu pouze v ose nástroje.

Problematika HSC je velmi široká. V posledních letech zaznamenala velký vývoj, který bude nadále pokračovat. V případě hliníkových slitin již HSC dosáhlo určité úrovně. V příštích letech osobně očekávám vývoj HSC v oblasti tvrdších materiálů, převážně v leteckém průmyslu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AB SANDVIK COROMANT, *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky.*, přeložil Kudela M., 1. vydání, Praha: Scientia, s. r. o. 1997. 857 s., ISBN 91-97 22 99-4-6
- [2] LEYENS, C., PETERS, M. *Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications*, 1. vydání, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003, ISBN 3-527-30534-3
- [3] VARGEL, C. *Corrosion de l'aluminium*, 1. vydání, Dunod, Paříž, 1999, str. 3-62, ISBN 2-10-004191-6
- [4] *Alumatter*, [Online], [cit 2011-5-17], dostupné na:
<<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=97&pageid=2144416168>>
- [5] TOURNIER, C. a kol. *Usinage à grande vitesse*, 1. vydání, Dunod, Paříž, 2010, ISBN 978-2-10-051810-4
- [6] DUDZINSKI, D., MOLINARI, A., SCHULZ, H. *Metal Cutting and high speed machining*, Third international conference on metal cutting and high speed machining, Metz, France, June 2001, 1. vydání, Kluwer Academic /Plenum Publishers, New York, 2002, ISBN 0-306-46725-9
- [7] MM Průmyslové spektrum, speciální vydání: *Konstrukce CNC obráběcích strojů*, MAREK, J., Praha: MM Publishing, září 2006, ISSN 1212-2572
- [8] *Alumatter*, [Online], [cit 2011-5-15], dostupné na:
<<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/fre/default.asp?catid=207&pageid=2144416934>>
- [9] MICHNA, Š. *Rozdělení Al-slitin do skupin*, [Online], [cit 2011-5-15], dostupné na: <http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/rozdeleni_AL_slitin.pdf>
- [10] VŠCHT, *studijní opory*, [Online], [2009] [cit. 2011-17-5], dostupné na:
<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_hlin_sl/index.htm>
- [11] *Amari, metal innovations*, [Online], [cit 2011-5-15], dostupné na:<<http://www.amari.at/website/fileadmin/pdf/Porovnan-oznaceni.pdf>>
- [12] *Proal hliníkové profily*, [Online], [cit. 2011-5-19], dostupné na:
<<http://www.proal.cz/>>
- [13] *Alfun, a. s.*, [Online], [cit. 2011-5-19], <<http://www.alfun.cz/hlinik.html>>

- [14] *Alumatter*, [Online], [cit. 2011-5-19], dostupné na :
<http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/01_applications.asp>
- [15] Feropol, s.r.o., [Online], [cit. 2011-5-15] dostupné na:
<http://www.feropol.cz/?info=slitiny_hliniku>
- [16] ITOIGAWA, F., et al. *Effects and Mechanisms in Minimal Quantity Lubrication Machining of an Aluminum Alloy*. *Wear*, 2/10, 2006, vol. 260, no. 3, pp. 339-344. [Online], [2011-5-21], dostupné na:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6V5B-4GTW8NJ-2/2/df00ca470ea9afd8ecb3c89e393b40be>>. ISSN 0043-1648
- [17] KOČMAN, K., PROKOP, J., *Technologie Obrábění*, 2. vydání, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2005, ISBN 80-214-3068-0
- [18] HUMÁR, A., *Technologie obrábění – 1. část, studijní opory pro magistr. studium*, UST FSI VUT v Brně, 2003, [Online], [cit. 2010-5-11], dostupné na: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_1.pdf>
- [19] TLUSTÝ, J., SCHUELLER, J., LEIGH, E., *Applying high-speed machining techniques on rotor grip configuration*, Montreal, American Helicopter Society 55th Annual forum, 1999, [Online], [cit. 2011-5-21], dostupné na:
<http://www.mfg-labs.com/FileDownload/Papers_Presentations/Paper%20-%20HSM%20of%20Aluminum%20Clevis%20Conf%20Leigh.PDF>
- [20] SCHULTZ, H., *Scientific Fundamental of HSC*, 1. vydání, Carl Hanser Verlag, Mnichov, 2001, ISBN 3-446-21799-1
- [21] NIEMINEN, I.; PARO, J., KAUPPINEN, V. *High-Speed Milling of Advanced Materials*. *Journal of Materials Processing Technology*, 1, 1996, vol. 56, no. 1-4, pp. 24-36. [Online], [cit. 2011-5-21] Dostupné na:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TGJ-43W07X1-3/2/322159a92300e9ab88f694fdff48d99>>. ISSN 0924-0136.
- [22] SVOBODA, T., SKOPEČEK, T., ŘEHOŘ, J. *MM Průmyslové spektrum*, [Online], [cit. 2011-5-15], dostupné na:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/tvorba-trisky-pri-vysokorychlostnim-obrabeni>>
- [23] SCHULTZ, H. *Fraisage grande vitesse des matériaux métalliques et non métalliques*, 1. vydání, Carl Hanser Verlag, Mnichov, Vídeň, 1989, do francouzštiny přeložil TORBATY, S., 1. francouzské vydání, Sofetec, Boulogne, 1997, ISBN 2-912540-00-3

- [24] *Wikipedie*, [Online], [cit. 2011-5-15], dostupné na:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Adiabatick%C3%BD_d%C4%9Bj>
- [25] ZAGHBANI, I., SONGMENE, V. *A Force-Temperature Model Including a Constitutive Law for Dry High Speed Milling of Aluminium Alloys*. *Journal of Materials Processing Technology*, 3/1, 2009, vol. 209, no. 5, pp. 2532-2544. [Online], [2011-5-21], dostupné na:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TGJ-4ST3YFD-1/2/b60551f0ac70798efdf3a011f806bbb1>>. ISSN 0924-0136
- [26] SKOPEČEK, T., *MM Průmyslové spektrum*, [Online], [cit. 2011-5-21], dostupné na: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc>>
- [27] MARUSICH, T.D., *Effect of friction and cutting speed on cutting force*, [Online], [cit. 2011-5-15], dostupné na:
<http://www.enginsoft.it/software/tws/tws_ae_publications/friction_cutting.pdf>
- [28] KOVÁŘ, J., *MM Průmyslové spektrum*, [Online], [cit. 2011-5-15], dostupné na: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani>>
- [29] YALLESE, M. A., BOULANOUAR, L., BELHADI, S., OUELAA, N. *Influence des conditions d'usinage sur les effort de coupe*, [Online], [cit. 2011-5-15], dostupné na: <http://www.umc.edu.dz/revuest/B25-Integrale/Article_B25_01.pdf>
- [30] SEGUY, S., DESSEIN, G., ARNAUD, L. *Surface Roughness Variation of Thin Wall Milling, Related to Modal Interactions*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 3, 2008, vol. 48, no. 3-4, pp. 261-274. [Online], [cit. 2011-5-14], dostupné na:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6V4B-4PR3G97-1/2/6589dfb8a43cb484efbeb225abfe3c36>>. ISSN 0890-6955
- [31] *Gasgoo Auto Global Sources*, [Online], [cit. 2011-5-21], dostupné na: <<http://www.gasgoo.com/auto-products/processing-parts-mould-302/1056153.html>>
- [32] *Obrábění rozměrných hliníkových dílů*, *MM Průmyslové spektrum*, [Online], [cit. 2011-5-21], dostupné na:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-rozmernych-hlinikovych-dilu>>

- [33] GF AgieCharmilles, *MM Průmyslové spektrum*, [Online], [cit. 2011-5-14], dostupné na: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/plne-automatizovane-triose-obrabeci-centrum>>
- [34] Okuma, [Online], [cit 2011-5-14], dostupné na: http://www.okuma.com/products/machines/hmc/millac-vh_series/millac1000vh/
- [35] OTKUR, M.; and LAZOGLU, I. *Trochoidal Milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 7, 2007, vol. 47, no. 9, pp. 1324-1332. [Online], [cit. 2011-5-21], dostupné na: <<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6V4B-4M1DB0X-1/2/08195da123bb941a68c38b98981076bc>>. ISSN 0890-6955
- [36] SUSILAWATI, A., *Generation of tool path for high speed pocket machining*, [Online], [cit 2011-5-14], dostupné na: <jst.eng.unri.ac.id/index.php/jst/article/download/11/32>
- [37] AjaxCNC, [Online], [cit. 2011-5-16], dostupné na : <<http://ajaxcnc.com/DM45.htm>>
- [38] PATELOUP, V.; DUC, E., RAY, P. *Corner Optimization for Pocket Machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 10, 2004, vol. 44, no. 12-13, pp. 1343-1353. [Online], [cit. 2011-5-21], dostupné na: <<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6V4B-4CMHRT9-6/2/0297db309a960b5da876a127bd812da2>>. ISSN 0890-6955

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
A_D	mm^2	Průřez třísky
a_e	mm	Radiální šířka řezu
a_p	mm	Axiální šířka řezu
c	N.s/m	Koeficient tlumení obráběcího systému
CAD	-	Computer Aided Design (modelizace geometrie součásti za pomoci počítače)
CAM	-	Computer Aided Manufacturing (modelizace obráběcího procesu za pomoci počítače)
CFRP	-	Carbon Fibre Reinforced Polymer (polymery s uhlíkovým vláknem)
CNC	-	Computer Numerical Control (číslicové řízení pomocí počítače)
ČSN	-	Česká technická norma
EN	-	Evropská norma
EN AW	-	Evropská norma pro tvářené hliníkové slitiny
F_c	N	Řezná síla (tečná složka řezné síly)
F_{cN}	N	Normálová složka řezné síly
F_f	N	Posunová síla
F_{fN}	N	Normálová složka posunové síly
F_p	N	Pasivní síla
f	Hz	Frekvence
f_t	Hz	Frekvence záběru mezi dvěma následujícími zuby frézy
f_{rev}	mm/ot	Posuv na otáčku
f_z	mm/zub	Posuv na zub
HSC	-	High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)
h	mm	Tloušťka třísky

ISO	-	Mezinárodní organizace pro normalizaci
k	N/m	Tuhost obráběcího systému
K_c	MPa	Měrná řezná síla
K_e	MPa	Měrný řezný koeficient vlivu ostří
m	kg	Ekvivalentní hmotnost
MRR	-	Material Removal Rate (úběr materiálu)
Q	mm ³ /min	Úběr materiálu
R_a	μm	Průměrná aritmetická úchylka profilu
R_m	MPa	[1] Mez pevnosti
$R_{p\ 0,2}$	MPa	Smluvní mezi kluzu
R_t	μm	Celková úchylka profilu
RŽ	-	Rozpouštěcí žíhání
t	s, min.	Čas
v_c	m/min	Řezná rychlost
v_f	mm/min	Posunová rychlost
k_r	°	Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
ρ	kg/m ³	Hustota
ϕ	°	Úhel stříhu
φ_{max}	°	Maximální úhel záběru zubu frézy

